



HAL
open science

Interactions Homme-Machine dans un environnement cyber-physique augmenté: vers une heuristique de conception d'environnements collaboratifs capacitants pour l'industrie du futur.

David Baslé

► To cite this version:

David Baslé. Interactions Homme-Machine dans un environnement cyber-physique augmenté: vers une heuristique de conception d'environnements collaboratifs capacitants pour l'industrie du futur.. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Grenoble Alpes, 2022. Français. NNT : 2022GRALI079 . tel-04021643v1

HAL Id: tel-04021643

<https://hal.science/tel-04021643v1>

Submitted on 16 Mar 2023 (v1), last revised 9 Mar 2023 (v2)

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

École doctorale : I-MEP2 - Ingénierie - Matériaux, Mécanique, Environnement, Energétique, Procédés, Production

Spécialité : GI : Génie Industriel : conception et production

Unité de recherche : Laboratoire des Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production de Grenoble

Interactions Homme-Machine dans un environnement cyber-physique augmenté : vers une heuristique de conception d'environnements capacitants pour l'industrie du futur

Human-Machine Interactions in an augmented cyber-physical environment: towards a heuristic for the design of enabling environments for the industry of the future

Présentée par :

David BASLÉ

Direction de thèse :

Frédéric NOEL

Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

Daniel BRISSAUD

Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

Co-encadrant de thèse

Rapporteurs :

Daniel MESTRE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Institut des Sciences du Mouvement

Nicolas MARANZANA

MAITRE DE CONFERENCES HDR, Arts et Métiers Sciences et Technologies

Thèse soutenue publiquement le **28 novembre 2022**, devant le jury composé de :

Frédéric NOEL

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Directeur de thèse

Daniel MESTRE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Institut des Sciences du Mouvement

Rapporteur

Nicolas MARANZANA

MAITRE DE CONFERENCES HDR, Arts et Métiers Sciences et Technologie

Rapporteur

Louis RIVEST

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, École Technologique Supérieure de Montréal

Examinateur

Jean-François BOUJUT

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Président du Jury

Invités :

Daniel BRISSAUD

PROFESSEUR DES UNIVERSITES, Université Grenoble Alpes

Fabien COUTAREL

MAITRE DE CONFERENCES, Université de Clermont-Auvergne



REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaiterais exprimer toute ma gratitude envers mes directeurs de thèse, messieurs BRISSAUD et NOËL, pour m'avoir permis de conduire ce projet de recherche et m'avoir prodigué moult conseils qui ont permis d'enrichir ma pensée, et ce, tout au long de ma thèse.

Par ailleurs, je tiens à remercier messieurs MARANZANA, et MESTRE pour m'avoir fait l'honneur de rapporter ma thèse. Leurs analyses et commentaires faits à l'aune de la lecture de mon manuscrit m'ont permis d'améliorer substantiellement celui-ci.

Je tiens aussi à remercier messieurs BOUJUT et RIVEST pour avoir été examinateurs lors de ma soutenance de thèse. Ici encore, les questions et les commentaires qu'ils ont pu me faire me permettent de reconsidérer mon propos global et d'accroître sa qualité.

D'autre part, je tiens à remercier l'ensemble des acteurs du projet ANR : Collaboration 4.0 à commencer par monsieur COUTAREL, professeur d'ergonomie au laboratoire ACTé, qui fut de bon conseil lors de nos entrevues et qui a su éclairer les failles de mon discours par l'intermédiaire de son point de vue d'ergonome. Je souhaite aussi gratifier d'un chaleureux salut Valérie ROCCHI, chef du projet ANR et Nathan COMPAN, doctorant ACTé.

Je souhaite aussi remercier l'intégralité des personnes qui ont bien voulu participer à mon étude expérimentale. L'ouverture d'esprit et la bienveillance avec laquelle ils ont bien voulu se prêter au jeu a permis l'émergence d'une belle expérimentation qui aura été très formatrice pour moi.

Enfin, je souhaiterais adresser pleins de bisous à ma famille, ma femme, Sabrina, et mon Doudou, Nolan, qui ont fait preuve de résilience et de patience envers moi, notamment lorsque le moral n'était pas au beau fixe et plus généralement tout au long de mon projet de reprise d'études.

RÉSUMÉ

La transition numérique opérée par l'émergence de concepts tels que l'Industrie du futur a pour vocation de rendre l'appareil productif plus flexible et plus performant. A côté de cette transition, les enjeux sociétaux et environnementaux deviennent de plus en plus importants au sein des industries. L'Humain est en relation avec de plus en plus d'individus, dans un espace physique et temporel, de plus en plus large. Par ailleurs, les moyens de communication évoluant, le salarié est en interaction constante avec une multitude de données qu'il convient de prendre en compte. Les postes de travail du futur seront à l'intersection entre le monde physique, où les biens manufacturés sont conçus et fabriqués, et le monde virtuel, où les données transitent à des fins de performance, d'autonomisation et de responsabilisation des personnels. Parmi tous les outils à disposition des industriels pour fabriquer l'usine du futur, les moyens immersifs et interactif que constituent les systèmes de Réalité Augmentée (RA) permettent la navigation des individus entre le monde physique et un monde virtuel. Des preuves de concept ont été élaborées afin de tester la robustesse des dispositifs à l'épreuve des performances prescrites. Certaines de ces expérimentations in-situ se sont avérées prometteuses, cependant, il est toujours difficile d'évaluer précisément à quel niveau se situe la valeur ajoutée pour l'organisation et l'opérateur dans l'adjonction d'une technologie de RA. Il faut donc repenser l'usage de la technologie et prospecter le couple Homme-Machine afin de pouvoir mieux comprendre où se situent les gains dans cette implantation de la technologie. Finalement, l'objectif consiste à concevoir les activités de travail collaboratifs du futur dans lequel l'opérateur et la technologie formeront un binôme réuni, qui concourront à l'obtention de la performance industrielle et au bien-être individuel.

Dans cette optique, le projet ANR : Collaboration 4.0 réunit les champs disciplinaires de deux laboratoires : l'ergonomie de l'activité avec le laboratoire ACTé, et le génie industriel avec le laboratoire G-SCOP. Le doctorant du laboratoire ACTé a procédé à l'élaboration de critères spécifiques visant à permettre l'émergence d'une situation de collaboration dite capacitante d'obtention des performances en situation de collaboration Homme-Machine. De notre côté, nous avons repris ces critères pour les déployer en objectifs opérationnels de conception d'une activité de collaboration Homme-Machine.

Nos travaux de recherche consistent dans un premier temps, en un travail de corrélation des critères ergonomiques d'une situation capacitante avec les caractéristiques polymorphiques des technologies de RA. Ensuite, nous créons une situation de collaboration Homme-Machine visant à justifier la pertinence des critères grâce à une étude expérimentale. Enfin, en parallèle de cette étude, et via un processus itératif alimenté par l'expérience et notre réflexion, nous bâtissons une heuristique de conception des activités de collaboration permettant d'une part, de caractériser la collaboration entre l'homme et la machine suivant des critères opérationnels de production, et d'autre part, de choisir les dispositifs de RA dont les caractéristiques technologiques concordent avec les spécificités de la situation de collaboration Homme-Machine conçue. L'étude expérimentale menée et l'heuristique élaborée permet de rédiger quelques préconisations à l'attention des décideurs industriels qui, selon nous, doivent considérer les critères d'une situation collaborative capacitante afin d'obtenir les performances requises lors de l'utilisation des technologies de RA.

MOTS CLÉS

RÉALITÉ AUGMENTÉE / INTERACTIONS HOMME-MACHINE / SITUATION DE COLLABORATION CAPACITANTE / MÉTHODE DE CONCEPTION / EXPÉRIENCE UTILISATEUR / INDUSTRIE DU FUTUR

ABSTRACT

The digital transition brought about by the emergence of concepts such as the Industry of the Future is intended to make the production apparatus more flexible and more efficient. Alongside this transition, societal and environmental issues are becoming increasingly important within industries. Human beings are in contact with more and more individuals, in an increasingly large physical and temporal space. Moreover, as the means of communication evolve, the employee is in constant interaction with a multitude of data that must be considered. The workstations of the future will be at the intersection of the physical world, where manufactured goods are designed and produced, and the virtual world, where data is transmitted for the purposes of performance, and empowerment of personnel. Amongst all the tools available to manufacturers to build the factory of the future, the immersive and interactive means of Augmented Reality (AR) systems allow individuals to navigate between the physical and virtual worlds. Proofs of concept have been developed to test the robustness of the devices against the prescribed performance. Some of these in-situ experiments have shown potential, however, it is still difficult to assess precisely where the added value for the organisation and the operator lies in the addition of AR technology. It is therefore necessary to rethink the use of the technology and to explore the human-machine union in order to better understand where the gains are to be found in the implementation of the technology. Finally, the objective is to design the collaborative work activities of the future in which the operator and the technology will form a united pair, which will contribute to the achievement of industrial performance and individual well-being.

From this point of view, the project ANR: Collaboration 4.0 brings together the disciplinary fields of two laboratories: the ergonomics of the activity with the ACTé laboratory, and industrial engineering with the G-SCOP laboratory. The doctoral student from the ACTé laboratory developed specific criteria aimed at enabling the emergence of a collaborative situation known as "enabling" to obtain performance in a Man-Machine collaborative situation. For our part, we have taken up these criteria and deployed them as operational objectives for the design of a Man-Machine collaboration activity.

Our research work consists, first of all, of a correlation of the ergonomic criteria of an enabling situation with the polymorphic characteristics of AR technologies. Then, we create a Human-Machine collaboration situation aiming at justifying the relevance of the criteria through an experimental study. Finally, in parallel to this study, and via an iterative process fed by experience and our reflection, we build a heuristic for the design of collaborative activities allowing, on the one hand, to characterise the collaboration between man and machine according to operational production criteria, and, on the other hand, to choose AR devices whose technological characteristics match the specificities of the designed Man-Machine collaboration situation. The experimental study carried out and the heuristic developed enable to draw up some recommendations for industrial decision-makers, who we believe that considering the criteria of an enabling collaboration situation in order to achieve the performance required in the use of AR technologies.

KEYWORDS

AUGMENTED REALITY / HUMAN-MACHINE INTERACTIONS / ENABLING COLLABORATION SITUATION / DESIGN METHOD / USER EXPERIENCE / INDUSTRY OF THE FUTURE

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	2
RÉSUMÉ.....	3
ABSTRACT.....	4
TABLE DES MATIÈRES.....	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	8
<hr/>	
INTRODUCTION.....	9
<i>Contexte</i>	9
<i>Contribution</i>	10
<i>Structure du manuscrit</i>	11
<hr/>	
PARTIE UNE : DE L'ÉMERGENCE DES SYSTÈMES CYBERPHYSIQUES DANS L'INDUSTRIE ET DE SES CONSÉQUENCES SUR L'HUMAIN	13
<hr/>	
CHAPITRE PREMIER : LES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION DANS L'INDUSTRIE DU FUTUR	14
<i>Section 1 Les postes de travail du futur</i>	14
I.1.1 Premier axe de développement : Les enjeux sociétaux et environnementaux	16
I.1.2 Second axe de développement : l'ajustement des organisations industrielles	18
I.1.3 Troisième axe de développement : L'adjonction de nouvelles technologies	20
<i>Section 2 Les systèmes cyberphysiques dans l'industrie</i>	22
CHAPITRE II : ARCHITECTURE ET CARACTERISTIQUES DES TECHNOLOGIES DE REALITE AUGMENTEE ET DE REALITE MIXTE	25
<i>Section 1 Description et architecture d'un système de Réalité Augmentée</i>	25
II.1.1 Une définition de la réalité augmentée	25
II.1.1.1 Quelques taxinomies relatives au continuum des réalités	25
II.1.1.2 De nouvelles réalités ?.....	26
II.1.1.3 Une proposition de taxonomie	29
II.1.2 Architecture d'un système de réalité augmentée	30
II.1.3 Un système de réalité augmentée - Le Microsoft Hololens 1 ^{ère} génération.....	33
<i>Section 2 Spécifications et fonctionnalités de la Réalité Augmentée</i>	36
II.2.1 Fonction Suivi.....	37
II.2.1.1 Suivi basé marqueur.....	39
II.2.1.2 Suivi basé sur des points d'intérêts	39
II.2.1.3 Suivi basé modèle 3D.....	40
II.2.1.4 Suivi basé sur le SLAM.....	41
II.2.2 Fonction Interface	43
II.2.3 Fonction Restitution.....	44
CHAPITRE III : DE L'INTERACTION ENTRE L'HOMME ET LA MACHINE : LES INTERFACES UTILISATEUR.....	53
<i>Section 1 Modalités d'Interaction Humain-Machine</i>	52
III.1.1 Quelques modèles d'architecture des interfaces homme-machine	53
III.1.2 Méthodes de conception et d'évaluation des interfaces	56
III.1.3 Interactions dans les interfaces homme-machine	60
III.1.4 Mesure de la pertinence des métaphores d'interaction.....	67
<i>Section 2 Interactions Homme-Machine & cognition humaine</i>	71
III.2.1 Quelques modèles de cognition humaine.....	71
III.2.2 Modélisation des activités humaines.....	75
III.2.2.1 La théorie de l'action	75
III.2.2.2 Modélisation des activités par décomposition des tâches	77
III.2.3 Les interfaces d'apprentissage aux tâches.....	78
III.2.3.1 Environnements d'apprentissage intelligents	78
III.2.3.2 Caractérisation d'un SLE.....	79
III.2.3.3 Interfaces d'apprentissage humain	80
III.2.3.4 Interface d'apprentissage humain d'identification.....	82
III.2.3.5 Interface d'apprentissage humain de pratique	83
III.2.3.6 Interface d'apprentissage humain de réflexion.....	84
CHAPITRE IV : L'APPRENTISSAGE HUMAIN DANS L'ENTREPRISE.....	85
<i>Section 1 Apprentissage humain en contexte industriel</i>	85

IV.1.1 Appropriation des concepts de SLE et de HLI à des fins d'exploitation industrielle	85
IV.1.2 Notre proposition d'environnement intelligent à l'usage d'un dispositif interactif.....	90
<i>Section 2 Captation et gestion des connaissances dans l'industrie</i>	<i>92</i>
IV.2.1 Le modèle de gestion de la connaissance.....	92
IV.2.1.1 La spirale des connaissances.....	93
IV.2.1.2 Le management de la connaissance en entreprise	94
IV.2.1.3 De l'art de communiquer la connaissance tacite acquise sur le terrain	97
IV.2.2 Notre proposition de captation de la connaissance en milieu industriel	100
<hr/>	
<i>PARTIE DEUX : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE : CRITÈRES DU CAPACITANT, OBJECTIFS, ET MOYENS MIS EN OEUVRE</i>	<i>102</i>
<hr/>	
CHAPITRE PREMIER : PROMOUVOIR LE COUPLE HOMME-MACHINE DANS L'INDUSTRIE.....	103
Section 1 Genèse : De l'approche par les capacités à l'environnement capacitant.....	103
Section 2 Acmé : Des conditions du couple Homme-Machine à travers le capacitant.....	106
I.2.1 Architecture conceptuelle de la première doctrine	108
I.2.2 Architecture conceptuelle de la deuxième doctrine	110
I.2.3 Architecture conceptuelle de la troisième doctrine.....	110
I.2.4 Vers une corrélation des concepts de Knowledge Management, du capacitant et des différents types de HLI	111
I.2.4.1 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la première doctrine du capacitant.....	112
I.2.4.2 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la seconde doctrine du capacitant.....	112
I.2.4.3 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la troisième doctrine du capacitant.....	113
CHAPITRE II : LES OBJECTIFS A ATTEINDRE : DEFIS A RELEVER ET HYPOTHESES DE RECHERCHE	115
Section 1 Verrous méthodologiques, techniques et scientifiques à lever	115
Section 2 Hypothèses de recherche au regard du séquençage des tâches.....	117
CHAPITRE III : LES MOYENS POUR Y PARVENIR : METHODOLOGIE DE NOTRE TRAVAIL DE RECHERCHE. 123	
Section 1 Une méthode pour coupler processus, technologies et les critères d'une situation de collaboration capacitante	123
III.1.1 Deux modèles de l'expérience utilisateur.....	124
III.1.1.1 Le modèle UX d'Hassenzahl.....	124
III.1.1.2 Le modèle UX de Thüning et Mahlke	126
Section 2 Les moyens de validation empiriques de notre méthodologie expérimentale....	128
III.2.1 Construction du moyen comparatif des situations de collaboration Homme-Machine.128	
III.2.2 Analyse du poste de formation en regard des trois doctrines constituant une Situation de Collaboration Capacitante (ECS)	129
III.2.2.1 Description du poste et de l'ancienne interface.....	129
III.2.2.2 Analyse de la situation de collaboration Homme-Machine à l'aune des critères du capacitant.....	133
III.2.2.3 Développement d'une nouvelle IHM basée sur les critères du capacitant	134
III.2.2.4 Présentation de la nouvelle IHM	136
III.2.3 Moyens de validation des critères du capacitant à travers la comparaison des deux interfaces.....	140
<hr/>	
<i>PARTIE TROIS : MÉTHODOLOGIE HEURISTIQUE DE CRÉATION D'ACTIVITÉS DE RÉALITÉ AUGMENTÉE ET EXPÉRIMENTATION</i>	<i>146</i>
<hr/>	
CHAPITRE PREMIER : RECHERCHES EXPERIMENTALES EN LABORATOIRE	147
Section 1 Cadre expérimental et protocole.....	147
I.1.1 Rappel des objectifs.....	147
I.1.2 Rappel des hypothèses.....	147
I.1.3 Méthode expérimentale.....	148
I.1.4 Données socio-démographiques des participants.....	151
I.1.5 Rappel des définitions des différentes dimensions mesurées.....	153
Section 2 Résultats obtenus et discussion.....	154
I.2.1 Introduction	154
I.2.2 Comparaison des UX vécues par rapport aux permutations effectuées	154
I.2.2.1 Condition de passation : Système 1 puis système 2.....	154
I.2.2.2 Condition de passation : Système 2 puis système 1.....	156
I.2.2.3 Condition de passation : Système 2 puis système 3.....	158
I.2.2.4 Condition de passation : Système 3 puis système 2.....	160
I.2.3 Évaluations globales par système considéré.....	161
I.2.4 Performances au poste de formation.....	169
I.2.5 Discussion autour des résultats.....	171

1.2.5.1 Corrélations entre âge et systèmes.....	171
1.2.5.2 Corrélations dans les dimensions utilisabilité et utilité	171
1.2.5.3 Corrélations dans les dimensions QP, QHI, QHS, QH et ATT	172
II.2.6 Conclusion sur l'étude expérimentale	173
CHAPITRE II : METHODOLOGIE HEURISTIQUE DE CREATION D'ACTIVITES.....	176
<i>Section 1 Modélisation des procédures de travail</i>	176
II.1.1 Phase 1 : Création de l'activité de collaboration Homme-Machine.....	178
<i>Section 2 Choix des dispositifs de RA/RM</i>	184
II.2.1 Phase 2 : Définition de l'identité de l'interface Homme-Machine.....	184
II.2.2 Corrélations entre identité des interfaces et technologies de RA.....	188
II.2.3 Phase 3 : Choix du dispositif de RA	190
CHAPITRE III : DISCUSSION A PROPOS DE LA METHODOLOGIE HEURISTIQUE	192
<i>Section 1 Quelques préconisations à l'attention des décideurs</i>	192
<i>Section 2 Limites relevées et améliorations à apporter</i>	194
III.2.1 Limites de l'étude expérimentale	194
III.2.2 Incertitudes associées à l'heuristique	194
<hr/>	
<i>CONCLUSION GÉNÉRALE</i>	197
<hr/>	
<i>Conclusion</i>	198
<i>Perspectives</i>	199
<hr/>	
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	201
<i>GLOSSAIRE</i>	209
<i>TABLE DES ILLUSTRATIONS</i>	212
<i>ANNEXES</i>	218
<hr/>	
ANNEXE 1.....	219
ANNEXE 2.....	220
ANNEXE 3.....	221
ANNEXE 4.....	222
ANNEXE 5.....	223
ANNEXE 6.....	225
ANNEXE 7.....	226
ANNEXE 8.....	228

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction

Contexte

Les industriels s'intéressent fortement aux technologies immersives et interactives, et notamment à la **Réalité Augmentée** (RA), avec des objectifs d'amélioration des processus de fabrication et d'assemblage, de maintenance, de contrôle et de formation. Quelques expériences ont été faites, notamment chez Safran où les kilomètres de câblage dans les avions sont intégrés à la structure de l'appareil à l'aide d'un outil de réalité augmentée¹. L'institut *Market Stateville Group* a publié en juin 2022 une étude portant sur l'évolution de la taille du marché mondiale de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle entre 2020 et 2027. Selon lui, le marché devrait passer de 14,2 milliards de dollars en 2020 à 90,2 milliards de dollars d'ici 2027². La part d'intérêt grandissante de la réalité augmentée pour le secteur industriel est donc un facteur prépondérant dans les recherches à mener afin de permettre une utilisation efficiente de celle-ci dans les industries du futur.

Un type d'analyse récurrent dans le milieu industriel consiste à considérer les choix technologiques offerts à l'industriel en regard de son outil de production existant. Celui-ci examine donc les différents postes de travail de son usine, et tente de répondre aux problématiques existantes sur ceux-ci par l'adjonction de la technologie. Ce genre d'analyse contraint cependant la technologie, la pressurise, jusqu'à ce que celle-ci devienne trop contraignante, vis-à-vis de son utilisation, en regard des gains qu'elle apporte sur la production, que ce soit d'un point de vue de la qualité des produits fabriqués, qu'en terme de productivité (*takt time* de la ligne de fabrication). On tente donc de faire corrélérer la technologie aux normes et aux standards que l'on a fixés préalablement, dans un temps où les systèmes de réalité augmentée ne faisaient pas partie de la boîte à outils de l'industrie, en considérant l'aspect matériel (*hardware*) et en éludant, voire en négligeant, le **Facteur Humain**. Anastassova et alii (**Anastassova et al., 2007**) déplorent d'ailleurs dès 2007 « [...] que peu de données objectives viennent étayer les hypothèses qui sont faites quant à l'intérêt, l'efficacité, l'utilisabilité, et l'acceptabilité de ces technologies ». En effet, l'approche visant à permettre l'implantation de la réalité augmentée sur les lignes de production est bien trop souvent *technocentrée* et ne considère l'humain que comme une variable contraignante puisque soumise à des effets de *cybercinétose* (*cybersickness*), ainsi qu'à des obligations de postures règlementaires et de ports de charges maximaux.

Replacer l'humain au cœur de notre réflexion pour valoriser l'emploi dans le tissu industriel en regard de la performance de ses entreprises consiste donc en la redéfinition des activités de collaboration Homme-Machine, prenant en compte, à la fois les technologies, mais aussi les facteurs humains, tels que définis par Anastassova et alii (**Anastassova et al., 2007**) : « Schématiquement, l'apport de l'ergonomie de la RA [...] se situe à deux niveaux : elles concernent 1/ l'utilisabilité de l'interface et des dialogues et 2/ l'efficacité des systèmes de RA pour l'apprentissage et les processus cognitifs impliqués ».

Ce verrou méthodologique tend à être abattu par des recherches sur ce sujet afin de concevoir les méthodologies de travail inhérentes à une collaboration plus efficiente entre l'Homme et la machine dans une perspective de redéfinition des activités de collaboration Homme-Machine propres aux ambitions affichées par le concept d'industrie du futur (**Ministère de l'Industrie, 2015**). Le projet ANR : Collaboration 4.0 est né du constat que les postes de travail tels qu'ils sont définis aujourd'hui, ne peuvent qu'être difficilement optimisés par l'ajout de technologies de type réalité augmentée. Il faut repenser la collaboration entre l'Homme et la Machine afin de permettre une acceptation de l'adjonction de la technologie de Réalité Augmentée (RA) sur le poste de travail « augmenté ».

¹<https://www.safran-group.com/fr/media/quand-la-realite-augmentee-optimise-la-maintenance-des-cablages-20170602>

² <https://www.marketstatsville.com/augmented-reality-and-virtual-reality-market>

La projet ANR : Collaboration 4.0 rapproche donc les champs disciplinaires de deux laboratoires de recherche, ACTé pour l'ergonomie de l'activité, G-SCOP pour les sciences de l'ingénieur et le génie industriel. L'objectif de ce projet est de permettre l'émergence de critères méthodologiques de mise en œuvre d'une situation de collaboration Homme-Machine efficiente. Pour cela, des travaux de recherche effectués par le doctorant du laboratoire ACTé (Nathan COMPAN), partenaire du projet ont permis l'émergence de trois doctrines définissant une situation capacitante, elles-mêmes basées sur l'évaluation écologique de situations de travail industrielles (via des monographies) :

Doctrine n°1 : Apprendre une nouvelle manière de faire plus performante et maintenir cet apprentissage.

Doctrine n°2 : Accroître les possibilités et les manières de faire disponibles dans les situations de collaboration.

Doctrine n°3 : Ajuster les attributs du couple Homme/Machine en fonction de la situation.

Ces trois doctrines contiennent divers critères. La première doctrine traite du caractère utilitaire de la collaboration Homme-Machine et de l'expérience vécue à son utilisation (critères d'**utilité** et de « **sensibilité à** »). La seconde doctrine brosse les moyens d'accroître le pouvoir d'agir d'un individu sur un poste de travail en situation d'usage de la technologie de RA. L'intérêt étant de lui permettre de pouvoir agir différemment en fonction du contexte. Ce critère est nommé **Marge de Manœuvre Situationnelle (MMS)**. Enfin la dernière doctrine traite des aspects matériels et organisationnels de la situation de collaboration Homme-Machine. Dans un premier temps les critères de **transparence opérative** (*comprendre la machine*) et **instrumentalisation** (*pouvoir de modifier la machine*) sont évoqués. Ensuite, les critères de **management habilitant** (*un management responsabilisant*), d'**espaces débat-travail** (*afin que les acteurs échangent sur leurs pratiques d'utilisation*) et de **réflexivité individuelle et collective** (*afin que les usagers puissent avoir le temps de réfléchir sur leurs pratiques et ainsi innover*) sont dressés.

L'élaboration des critères du capacitant et de la définition d'une situation d'usage capacitante effectués par Nathan Compan, nous ont permis de pouvoir travailler plus précisément sur le couple Homme-Machine sur un poste de travail.

Contribution

La problématique de recherche principale inhérente à notre projet de thèse consiste donc en la création d'une heuristique permettant de concevoir des situations de collaboration capacitantes. Afin d'atteindre ce but, il faut faire corrélérer les caractéristiques des technologies de Réalité Augmentée aux spécificités des processus industriels ainsi qu'aux trois doctrines de définition d'une situation capacitante exposées dans le paragraphe précédent. Le but est d'accroître les capacités d'actions et les compétences des individus lors de l'utilisation des technologies de RA.

Notre contribution vise donc à reprendre les doctrines et les critères du capacitant, pour les transformer en solutions techniques, et les analyser à l'aune des différentes caractéristiques constitutives d'un système de réalité augmentée, tant du point de vue matériel que logiciel. Ce sera l'objet de la première tâche à accomplir, effectuer les corrélations entre les critères du capacitant et les critères technologiques. Sur la base des mêmes considérations ergonomiques et technologiques, il faut définir une méthodologie de choix des dispositifs de RA afin de permettre à l'industriel de poser un choix rationnel basé non plus sur un ensemble de critères potentiellement fallacieux mais sur un ensemble de paramètres dérivés des constatations effectuées sur le processus industriel sur lequel il souhaite adjoindre une technologie de RA. Ceci sera l'objectif de la tâche deux. Les tâches trois et quatre ont pour but de déterminer les critères de mesure et d'évaluer une situation de collaboration Homme-Machine (conçue ou reprise) par rapport à tout ou partie des critères du capacitant élaborés par ACTé. Cette situation de collaboration capacitante est évaluée au sein d'une étude expérimentale dont l'une des finalités est de

produire un démonstrateur à destination des industriels désireux de voir comment les doctrines du capacitant ont été mises en œuvre. Enfin, la dernière tâche, résultante des quatre tâches précédentes doit être la rédaction de préconisations portées à l'attention des décideurs industriels qui pourront à la fois prendre connaissance de ces recommandations et observer leurs mises en application sur le démonstrateur.

La complétion de ces différentes tâches doit permettre de résoudre la problématique suivante : Repenser la collaboration entre l'Homme et la Machine afin de permettre une acceptation de l'adjonction de la technologie de Réalité Augmentée (RA) sur le poste de travail « augmenté ».

Structure du manuscrit

Le manuscrit est construit autour de trois parties distinctes (figures 1 et 2). La première partie (fig.1) est composée de quatre chapitres et forme l'État de l'Art (avec le chapitre premier de la partie DEUX). Le chapitre premier de cette partie traite des éléments généraux de l'industrie du futur et des systèmes cyberphysiques au sein de l'usine numérique. Le chapitre II fait l'état des classifications de la Réalité Augmentée et de l'architecture des dispositifs interactifs. Le chapitre III explicite la conception et de l'évaluation des interfaces Homme-Machine. En parallèle est effectué un état des lieux des interacteurs et des métaphores d'interaction disponibles au sein de ces interfaces. Une première introduction est faite sur la cognition humaine et ses moyens mis en œuvre pour parvenir à interagir avec les IHMs d'apprentissage humain à l'aide d'interfaces Homme-Machine dédiées. Le dernier chapitre, traite spécifiquement de cas d'usage où les IHMs d'apprentissage ont été implantées. La seconde section du chapitre expose également une façon dont est capturée et gérée la connaissance en entreprise.

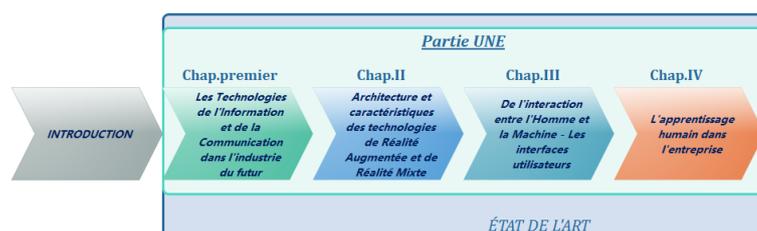


Figure 1: Structure de la partie UNE du document.

Les critères du capacitant sont définis au chapitre premier de la partie DEUX (fig.2). Le chapitre II de cette partie évoque les questions de recherche et les tâches utiles pour résoudre ces diverses questions. Enfin le chapitre III décrit quelques méthodes de design UX et détaille les deux IHMs utilisées lors de l'étude expérimentale. Par ailleurs, des explications sur la procédure de l'expérimentation et les questionnaires d'évaluation de l'expérience utilisateur sont fournies dans ce chapitre.

Dans la dernière partie (fig.2), le chapitre premier détaille les résultats obtenus lors de l'étude expérimentale, le chapitre II explicite l'heuristique de choix des dispositifs de RA en fonction des paramètres de l'activité de collaboration Homme-Machine créée. Le chapitre III fournit une discussion sur la validité de l'étude et de l'heuristique à la lumière des éléments limitants et des perspectives évoquées.

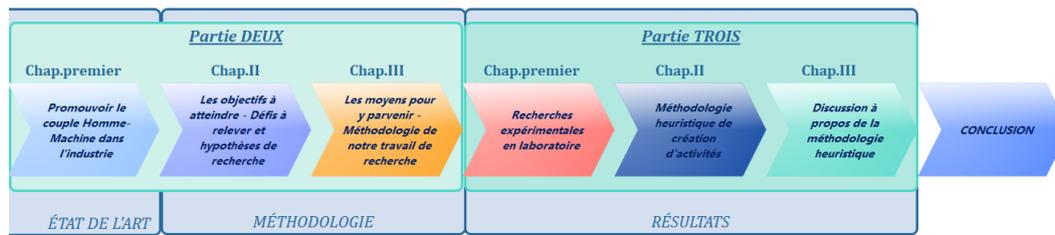


Figure 2: Structure des parties DEUX et TROIS du manuscrit.

***Partie UNE : DE L'ÉMERGENCE DES SYSTÈMES
CYBERPHYSIQUES DANS L'INDUSTRIE ET DE SES
CONSÉQUENCES SUR L'HUMAIN***

Chapitre premier : Les Technologies de l'Information et de la Communication dans l'industrie du futur

Section 1 Les postes de travail du futur

Dans leur livre datant de 2018, Julien et Martin (**Julien and Martin, 2018**) dressent un état des lieux de la société française et des besoins industriels qui en résultent en ces termes : « *Notre société connaît une profonde transformation liée aux technologies numériques. [...] collaboration et personnalisation sont deux facteurs clés liés à la numérisation. Par conséquent, notre façon de consommer se transforme également, au même titre que nos besoins et nos attentes en termes de produit et de service. L'usine du futur est la réponse nécessaire à cette évolution, basée sur des innovations de rupture essentiellement dans les domaines du pilotage (digital factory) et du façonnage (digital manufacturing), afin de maintenir une activité industrielle compétitive* ». Les consommateurs deviennent par ailleurs plus exigeants dans leurs actes d'achat, de par l'intérêt qu'ils portent aux caractéristiques du produit (qualité et personnalisation) et de ses services associés, mais aussi par l'impact sociétal et environnemental induit par la fabrication des biens manufacturés qu'ils consomment. L'alliance Industrie du futur parle d'un changement de paradigme partant d'un « marketing produit » pour aller vers un « marketing client » (**Alliance Industrie du Futur, 2018**). Pour Julien et Martin, l'usine du futur « *est une réponse à ces évolutions énergétique, écologique, numérique, organisationnelle et sociétale. Reposant sur des technologies existantes ou émergentes, elle demande de repenser aussi bien la façon de piloter l'entreprise que la façon de produire avec une refonte complète de l'organisation de l'entreprise dans un monde où les outils numériques font tomber la cloison entre industrie et services* ». Les auteurs considèrent la transition numérique des chaînes de production à l'aune de la considération de trois axes majeurs. Les usines de production dans l'industrie du futur seront :

- **Performantes** : orientés client, les appareils productifs s'adapteront aux desideratas des clients tout en garantissant une excellente traçabilité et une qualité des produits manufacturés. L'évolution des moyens technologiques mis en œuvre pour la fabrication des produits auront pour conséquence de faire évoluer les bagages académiques des personnes travaillant dans ces usines. Les technologies permettront la complétion de tâches à très fortes valeurs ajoutées à l'aide de systèmes dévolus à cet effet (réalité augmentée). Ces technologies auront un impact bénéfique sur la qualité des produits manufacturés et sur la productivité de l'appareil de production.
- **Flexibles** : les systèmes décisionnels portés par des technologies comme les TIC (**Technologies de l'Information et de la Communication**) permettra de faire communiquer les machines au travers d'un système cyber-physique performant. Le système pourra ainsi anticiper les besoins en matières premières ou bien les changements de séries ou de production avec une agilité jamais atteinte jusqu'alors. La reconfiguration du système de production à l'aune de ses fluctuations de consommation permettra une optimisation des intrants et des extrants via la reconfiguration de la chaîne de création de valeur.
- **Responsables** : Les chaînes de fabrication du futur seront économes en énergie et en consommation de matières premières. Les produits seront éco-conçus donc pensés en amont de leur fabrication pour être par la suite recyclés au maximum et contribuer ainsi l'émergence d'une économie circulaire vertueuse pour l'environnement.

Par ailleurs, les usines dans le futur encourageront la responsabilité et la collaboration des individus sur la chaîne de production. Ces individus verront leur travail évoluer pour être toujours plus qualitatif, les tâches répétitives et pénibles étant dévolues aux machines. Les usines de notre futur permettront aussi l'inclusion de personnes largement exclues aujourd'hui (handicapés mentaux et physiques, autistes, ...) grâce à l'ajout de

technologies permettant de compenser les déficits cognitifs (réalité augmentée) et/ou physiques (*robotique collaborative*) de celles-ci.

Cette usine, à l'intersection des trois axes décrits précédemment, nous la nommons *industrie du futur* (en France) ou bien *industrie 4.0* (en Allemagne) (**Alliance Industrie du Futur, 2018**; **Julien and Martin, 2018**; **La Fabrique de l'Industrie, 2017**; **Oztemel and Gursev, 2020**).

Le concept d'industrie du futur est né en France à la suite des réflexions menées par l'Allemagne dans les années 2000. Permettant une interconnexion entre les différentes entités de production d'une usine, faisant de celle-ci, une usine connectée, intégrée et flexible ; l'objectif étant de produire aux coûts de l'automatisation de masse avec les possibilités de personnalisation propres à la demande des clients d'aujourd'hui. Selon une classification donnée par le BCG, la transformation numérique des entreprises se focalise sur neuf piliers technologiques :

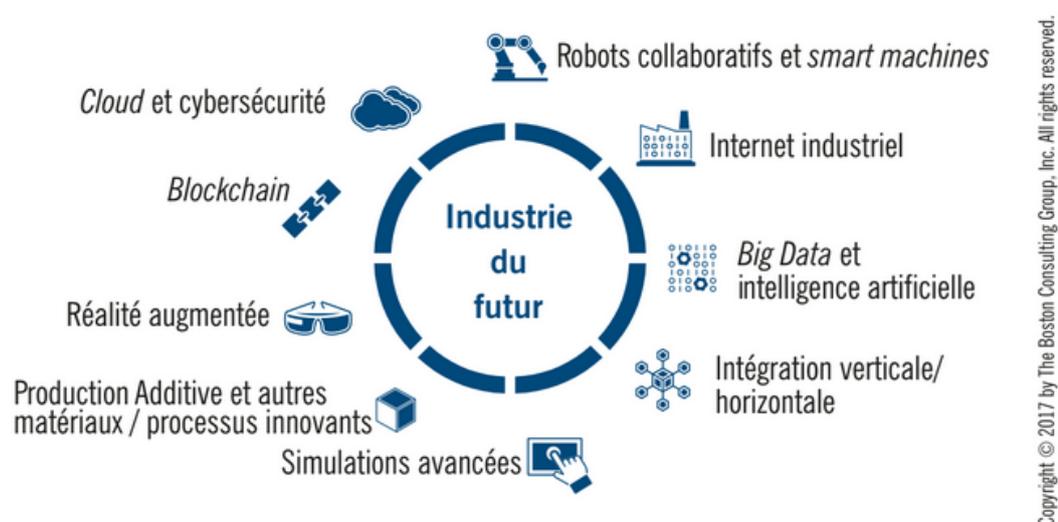


Figure 3: Une classification des technologies dites 4.0 déterminantes dans le cadre de l'industrie du futur. Crédits photo : The Boston Consulting Group.

La démarche qu'a engagé l'État Français a pour objectif de redynamiser le secteur industriel sur le territoire à travers un programme d'accompagnement méthodologique et financier des PME et des ETI (*Entreprises de Taille Intermédiaire*) françaises d'un montant d'un milliard d'euros. Ce programme baptisé « Nouvelle France Industrielle » et lancé en 2015, contient 34 plans (**Ministère de l'Industrie, 2015**) permettant de combler le retard français vis-à-vis de la chose industrielle, notamment en regard de l'Allemagne.

La mise en place de ce programme a pour objectif de redynamiser le secteur industriel, en accompagnant les PME et les ETI dans leur transformation digitale, au travers de la création, en juillet 2015, d'une association loi 1901, l'Alliance Industrie du Futur³. Celle-ci pilote donc la transformation du tissu industriel français en guidant celui-ci vers une modernisation de son appareil productif et vers une numérisation accrue des usines tout en privilégiant les énergies vertes, et en favorisant le facteur humain.

Sur la base des informations décrites dans le plan Français et sur les enjeux pour les chaînes de production du futur à s'adapter aux besoins évolutifs des marchés, nous entrevoyons trois axes de développement pour l'industrie du futur en France.

³ <http://www.industrie-dufutur.org/>

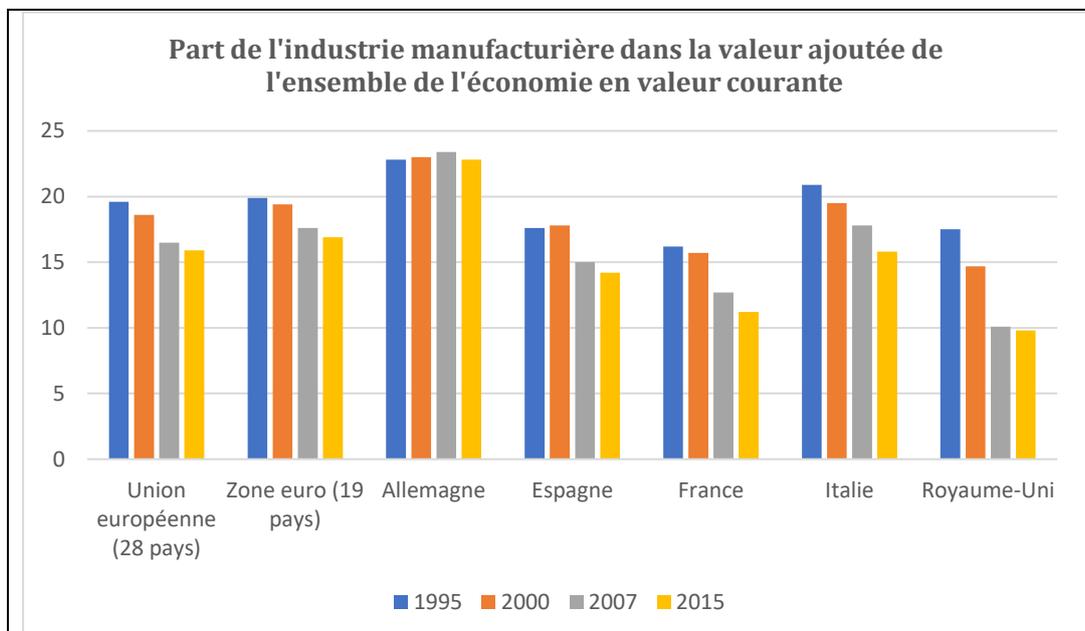


Figure 4: Part de l'industrie manufacturière dans quelques pays de l'Europe. Source : INSEE.

Le poids de l'industrie française s'est effondré passant de 17% en 1995, à seulement 11,2% de son PIB en 2015, quand l'Allemagne se maintient à 22,8%, l'Italie à 15,8% et l'Espagne à 14,2%. Pire, la France se situe sous la moyenne européenne de 15,9%. L'INSEE note un repli de 16% des emplois industriels en France entre 2006 et 2015, ce qui représente l'équivalent de 530 000 salariés en moins dans l'Hexagone.

I.1.1 Premier axe de développement : Les enjeux sociétaux et environnementaux.

Les réflexions inhérentes aux changements de paradigmes productivistes faits à l'aune du constat d'événements climatiques toujours plus erratiques associés à une tension géopolitique grandissante impactant l'approvisionnement en matières premières comme le pétrole, les métaux rares, le gaz, etc..., conduit les politiques actuels à réfléchir à des moyens de réduire la consommation de nos usines.

Les usines du futur devront donc avoir un impact réduit au maximum voire nul afin de moins dépendre de nations concurrentes ayant un(des) monopole(s) sur une(des) matière(s) première(s) stratégique(s). Pour ce faire, des pistes sont envisagées.

En premier lieu, les bâtiments devront posséder des caractéristiques de hautes efficacité énergétiques. L'Alliance industrie du futur (**Alliance Industrie du Futur, 2018**) traite du sujet en imaginant des structures architecturales largement vitrées afin d'augmenter la luminosité et de faire baisser les besoins en chauffage. L'association loi 1901 considère d'ailleurs ce poste [*id est* : le chauffage] comme étant le premier poste de dépense des entreprises d'aujourd'hui. Des bâtiments vitrés, végétalisés et équipés de panneaux photovoltaïque permettrait de réduire l'empreinte carbone des usines sur les dépenses énergétiques de fonctionnement usuels (chauffage, processus, etc...).

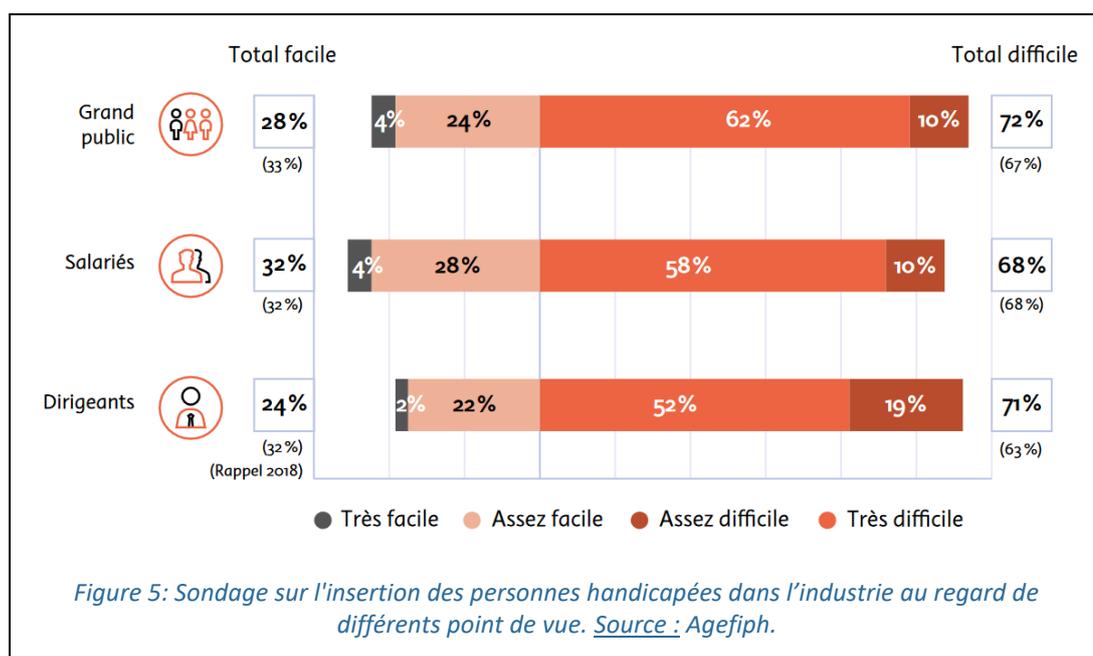
Ces usines auront vocation à être installées en centre-ville afin de diminuer les dépenses énergétiques en transport pour les salariés et visiteurs des sites industriels. Recentrer l'usine dans son écosystème urbain nécessite de repenser l'architecture des bâtiments pour que ceux-ci s'insèrent harmonieusement dans les espaces urbains. Des problématiques de gestions des déchets physiques, gazeux et aqueux sont de nouvelles problématiques à lever pour les chercheurs des domaines concernés.

Hormis, les problématiques inhérentes aux extrants exposés précédemment, les intrants de matières doivent être repensés à deux niveaux : au niveau de la conception d'une part, via l'optimisation du dimensionnement des produits par l'utilisation de moins de matière première et par des méthodes d'écoconception, procédé par lequel le produit est pensé pour être sobre en utilisation de ressources tout au long de son cycle de vie. Les capacités de celui-ci à être monté/démonté, en vue d'un recyclage ou d'une réparation, sont améliorées, l'utilisation de matières premières lors de sa phase d'utilisation sont optimisées pour être les plus économes possibles, les dérives liées à l'obsolescence programmée sont arrêtées au profit d'un **business model** repensé par les acteurs économiques dans lequel les industriels pourraient continuer à faire du profit sur la base d'ajout de fonctionnalités payantes ou par la vente de pièces détachées. Deuxième niveau de réflexion : la production. L'organisation industrielle doit fiabiliser ses processus par une augmentation substantielle de sa production afin de réduire les rebuts de fabrication et les coûts non-qualité, coûts doublements polluants : par la consommation de matières premières d'une part, par l'énergie employée à fond perdu, d'autre part.

Au-delà de la question environnementale, les questions sociétales soulevées par les difficultés toujours plus grandes de recruter de la main d'œuvre en production nécessite de repenser la place de l'Humain dans l'organisation. Celui-ci ne doit plus être considéré comme un rouage de la chaîne de production consistant à effectuer sempiternellement les mêmes actions répétitives et abrutissantes.

Au contraire, il faut reléguer ces tâches aux machines et laisser aux individus l'opportunité d'exploiter leur intelligence au profit de l'amélioration continue du processus. Une reconsidération du mode de management des personnels par les services des Ressources Humaines permettra d'augmenter les compétences et les connaissances des travailleurs. Les techniques de capitalisation et de transmission des connaissances, les possibilités de formation tout au long de la vie professionnelle (FTLV), l'autonomie et la responsabilisation accrue des salariés et l'implication de ceux-ci dans le développement de l'entreprise sont autant de démarches permettant la valorisation et la fidélisation des salariés à l'organisation.

L'inclusion de personnes en état de difficulté d'accès à l'emploi, notamment les personnes en état de handicap physique et surtout mental sera un facteur important dans le futur. Il en va de la responsabilité de l'entreprise de tenir les engagements liés à l'OETH (**Obligation d'Employabilité des Travailleurs Handicapés**) qui est, aujourd'hui, largement non respectée. L'adjonction de technologies compensant les difficultés cognitives pour les employées en situation de handicap mental par exemple sera un point bénéfique majeur pour l'employabilité de ce type de salarié.



L'employabilité des personnes en situation de handicap est un sujet difficile en France. Une étude de l'Agefiph (Association de Gestion du Fonds pour l'Insertion Professionnelle des Personnes Handicapées) a publié le rapport d'une étude faite en 2019 et portant sur l'emploi des handicapés en France. Cette étude révèle de profonde et durable difficulté d'ouverture à l'emploi pour ce type de personnel. Rappelons que l'OETH (Obligation d'Employabilité des Travailleurs Handicapés) défini en France est de 6%. Or, des difficultés d'accès à l'emploi ponctue toujours le parcours de ces travailleurs. Les dirigeants d'entreprises sondés dans cette étude considèrent à 71% (contre 63% en 2018, soit 8 points de plus en 1 an) qu'il leur est difficile d'embaucher des personnels en situation de handicap. Les raisons principalement évoquées sont la difficulté à effectuer les tâches courantes (60% des sondés l'expriment), la difficulté d'encadrer une équipe (60% des sondés), les difficultés pour progresser au sein de la hiérarchie (57% des sondés), la difficulté de s'épanouir professionnellement (49% des sondés) et l'impossibilité de se faire respecter par les autres salariés (31% des sondés).

Par ailleurs, le Ministère des solidarités a publié les chiffres de chômage pour 2022 (travailleurs handicapés versus tout public). Ceux-ci révèlent un taux de chômage environ deux fois supérieur sur la période 2018-2022 (14% contre 8% tout public en 2022 et 18% contre 9% tout public en 2018).

Les principes de la RSE (*Responsabilité Sociale et Environnementale*) dont les grands principes ont été énoncés dans la norme ISO 26000 ont pour vocation à tracer une ligne de conduite à tenir pour les entreprises ayant la volonté de respecter des valeurs de respect des Hommes et de l'environnement. Les consommateurs étant de plus en plus attentifs à ces sujets, les entreprises possédant cette image de vertu supplémentaire posséderont un substantiel avantage compétitif sur leur(s) concurrent(s).

I.1.2 Second axe de développement : l'ajustement des organisations industrielles

Quelques points ont déjà été esquissés dans le paragraphe précédent concernant la refondation de l'organisation, notamment au travers de sa dimension managériale. Si l'Humain doit redevenir une valeur cardinale, et donc un point d'intérêt pour les hiérarchies des organisations, c'est parce que celui-ci est à la base de l'innovation continue à laquelle peut prétendre toute organisation industrielle, pourvue qu'elle donne les moyens aux parties prenantes de s'exprimer. A ce titre, des systèmes de réseaux sociaux émergent lentement en entreprises faisant la part belle à la créativité, l'émulation intellectuelle basée sur la collaboration des individus. La collaboration à l'innovation passe par la *coconception avec les acteurs* de la chaîne de création de valeur : les fournisseurs, les salariés de l'entreprise mais aussi les clients potentiels.

La flexibilité de l'appareil productif sera un autre point majeur de ce second axe de développement. Pour que les chaînes de fabrication soient suffisamment agiles, il faudra une collaboration accrue entre l'Homme et la machine. Cette collaboration efficiente ne sera possible que si les ressources humaines permettent l'acquisition d'un socle de compétences plus large pour que les individus puissent s'adapter efficacement aux situations changeantes et que si le système productif permet cette flexibilité. Des technologies dédiées à cet objectif sont déjà en cours d'élaboration. Citons l'Internet des Objets, l'infonuagique, les technologies immersives et interactives (réalité augmentée, réalité virtuelle) ou encore les *smart machines*.

La reconfigurabilité et la fiabilité des approvisionnements et des livraisons aux clients nécessitent une anticipation et une supervision de tous instants. Si les technologies exposées précédemment ont un intérêt pour faire remonter l'information au niveau supérieur (IoT, *smart machines*) ou à la stocker sur des serveurs dédiés (infonuagique), le

traitement de celle-ci nécessite une architecture logicielle repensée d'un point de vue du processus et au travers de la chaîne de création de valeur.

L'intégration verticale est la capacité de reconfigurabilité de l'appareil productif via une connexion hiérarchique entre toutes les strates la composant (voir la pyramide d'automatisation figure 6. Selon le modèle ISA 95). Les machines agrémentées de capteurs et d'actionneurs agissent telles des systèmes cyber-physiques dont la fonction est de faire remonter le flux d'information au système de supervision immédiatement supérieur. Ces systèmes de supervision normés (*ISO 61158*) utilisent des architectures réseaux et des IHMs (*Interfaces Hommes-Machines*) spécifiques pour communiquer avec les machines. Les systèmes SCADA (*Système de contrôle et d'acquisition de données*) sont parmi les plus connus et prometteurs. Au-dessus, deux types de logiciels sont utilisés, les MES et les ERP. Les MES permettent le contrôle des données remontées du terrain et permettent un pilotage fin de la production. Les ERP peuvent être à l'intersection entre les entités de production, de bureau et des services de marketing.

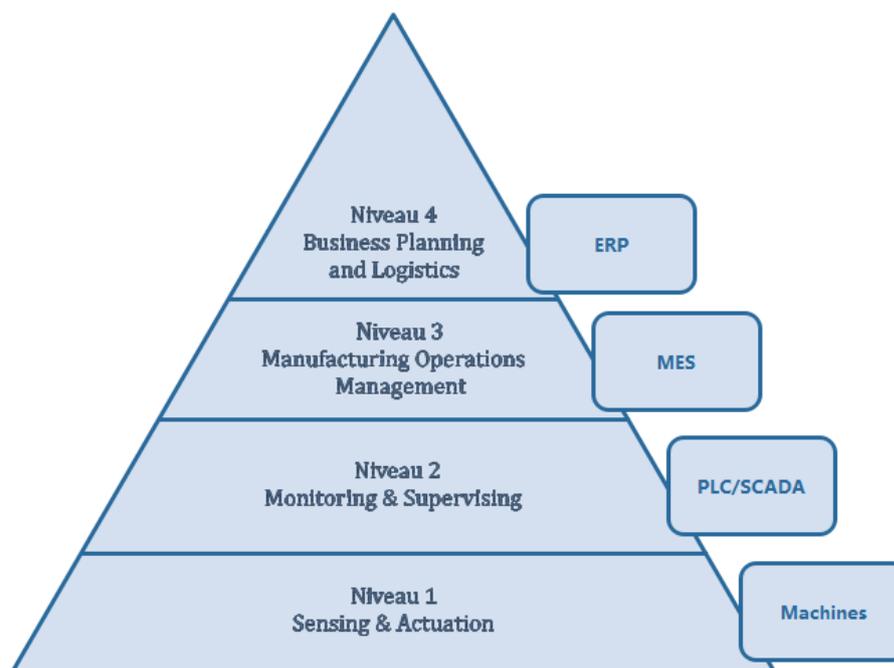


Figure 6: La pyramide d'automatisation selon le modèle ISA 95. Chaque niveau est associé à un type de système (ERP, MES, etc.). D'après (Åkerman, 2018).

Au niveau de la création de la chaîne valeur, nous parlons d'intégration horizontale : les logiciels dédiés servent à faire communiquer les diverses parties prenantes (qualité, R&D, méthodes, process, achat, etc...). Les chaînes logistiques discutent entre elles via des progiciels dédiés et connectés (ERP, MES) ainsi que les outils de GPAO habituels. Ces chaînes logistiques étant intimement liées aux fournisseurs de l'entreprise, les enjeux de compréhension entre les diverses parties prenantes internes et externes à l'organisation deviennent fondamentaux. Les chaînes techniques sont, elles, connectées entre elles grâce à l'analyse du cycle de vie des produits : le PLM garant de l'unité du chaînage numérique (IFIP WG 5.1) inhérent à l'utilisation des logiciels divers (simulation, CAx, CRM).

Finalement, l'adjonction de technologies numériques permet de repenser l'organisation industrielle et de créer des passerelles de communication entre les services de l'entreprise et entre les différentes parties prenantes externes à cette entreprise. L'usine du futur doit pouvoir communiquer avec toutes ces parties prenantes en utilisant un langage commun, compréhensible par tous afin de pouvoir se reconfigurer efficacement pour gagner en compétitivité.

I.1.3 Troisième axe de développement : L'adjonction de nouvelles technologies

L'usine du futur s'appuie largement sur l'adjonction des nouvelles technologies du numériques et sur les avancées dans les domaines des matériaux et de la fabrication pour créer de la plus-value au sein des entreprises.

Les procédés de l'industrie du futur auront pour vocation de permettre un saut technologique important, en réduisant notamment les temps de fabrication. En effet, de nombreux procédés de mise en forme des matériaux évitent des étapes de finition sur des postes adjacents. Les phases de prototypages seront aussi réduites considérablement grâce à des procédés comme la fabrication additive. Enfin, des procédés de traitement de surface sont à l'étude directement au sein des machines de mise en forme des matériaux : c'est le cas notamment dans les procédés d'emboutissage et de formage.

Nous l'évoquons dans le paragraphe précédent, les machines intelligentes (ou *smart machines*) seront l'un des points majeurs de l'évolution de nos usines dans le futur. Celles-ci, par l'intermédiaire de capteurs pourront analyser leur environnement, transmettre et recevoir des informations en provenance des logiciels de contrôle et d'acquisition de données et reconfigurer leur mode opératoire aux changements et aux aléas de production. Parmi ces machines, les robots collaboratifs (cobots) tiennent une place de premier ordre. Celui-ci a pour objectif de travailler en synergie avec l'opérateur, ce dernier pouvant déléguer des tâches répétitives ou occasionnant un risque ou une pénibilité. Ces derniers ont aussi la capacité d'être reconfiguré par l'opérateur de façon simplifiée par apprentissage des gestes de la nouvelle tâche. Enfin, un cobot pourrait astucieusement remplir la fonction de second bras dans le but d'assister une personne en situation de handicap physique sur des tâches de production.

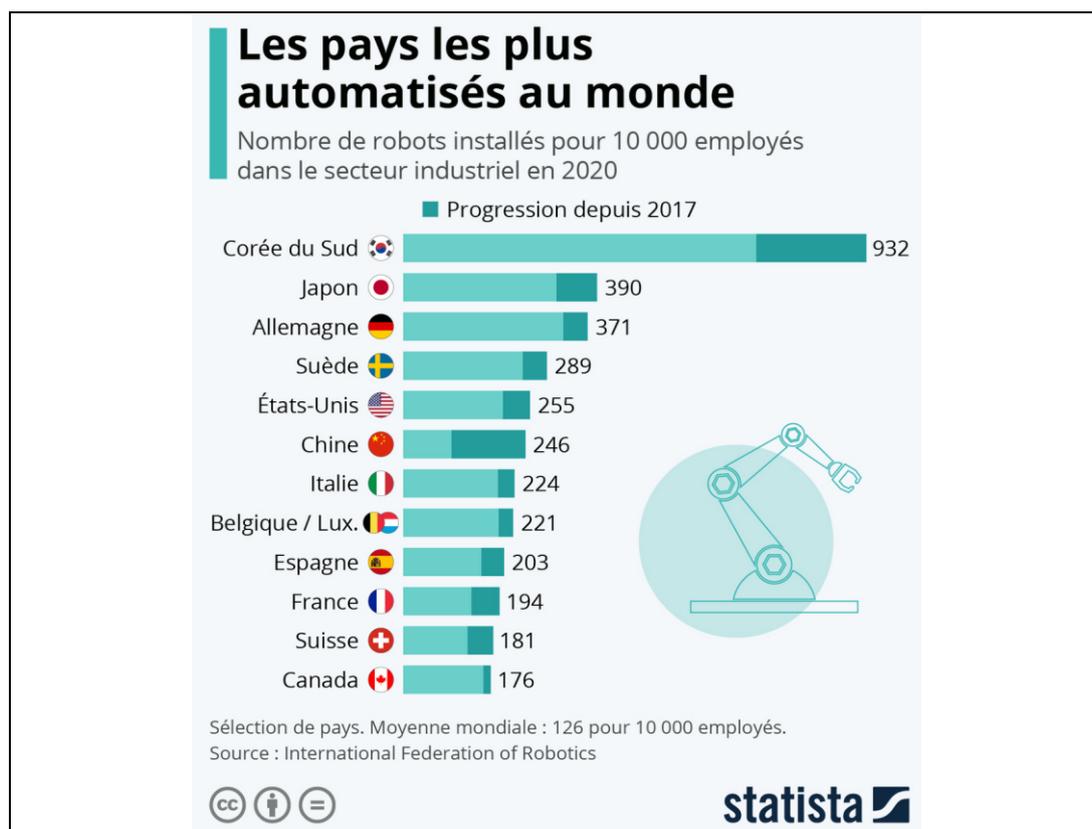


Figure 7: Taux de robotisation de quelques grandes nations industrielles mondiales.

La France accuse un retard important par rapport à ses concurrents sur la scène internationale. Un rapport de la IFR (International Federation of Robotics) pointe un taux de robotisation de 194 robots pour 10 000

employés en 2020. Ce nombre est très en retrait par rapport à ses voisins européens que sont l'Allemagne en premier lieu avec 371 robots et l'Italie avec 224 robots. La croissance est pourtant en forte hausse notamment dans les secteurs de l'électronique ou la robotique à démontrée qu'elle était capable de pourvoir aux besoins spécifiques de ce secteur industriel. Viennent ensuite les secteurs de l'automobile et de la métallurgie avec notamment un déclin très fort de l'industrie automobile, secteur le plus équipé en robots en France.

Parmi les technologies porteuses de compétitivité, notons pour finir les TIC (pour Technologies de l'Information et de la Communication). Celles-ci sont la pierre angulaire de l'usine du futur car elles permettent de numériser celle-ci et de faire émerger un monde virtuel, où les données et les objets virtuels viennent interagir avec le monde physique. Selon Julien et Martin (**Julien and Martin, 2018**), le jumeau numérique est « *un modèle logiciel dynamique d'un objet ou d'un système cyberphysique qui repose sur des données de capteurs. Un jumeau numérique est un modèle virtuel d'un processus, d'un produit ou d'un service utilisé pour détecter des problèmes, tester et simuler des scénarios sur le modèle physique d'une unité de production* ». Les auteurs ajoutent que « *l'acquisition de données réelles permet d'affiner les modèles* » [*id est, des modèles virtuels des processus*]. Or, ces données ne peuvent être utilisées à bon escient qu'à partir du moment où un système d'acquisition et de traitement de données a été installé. C'est le rôle de plusieurs technologies : l'IoT permet aux objets physiques de communiquer avec le monde virtuel via l'intelligence qui leur sera désormais intégré dès la production. L'infonuagique permet le stockage des données dans un réseau, le plus souvent Internet. La somme des données collectées sera traitée et rendue lisible par les technologies du **Big Data**. Enfin la gestion de ces données aura pour conséquence de renvoyer un flux d'information de reconfiguration ou de modification du système de production aux technologies qui y sont connectées : le jumeau numérique, les machines, les logiciels de simulation et de supervision mais aussi les systèmes de réalité augmentée et de **réalité virtuelle**, etc.... Ce processus devra être entièrement sécurisé par les technologies de la **cybersécurité**, et de la **blockchain** pour pouvoir fonctionner efficacement.

Finalement, le poste de travail du futur revêtira la forme d'un travail basé sur les technologies du numérique où l'individu est en lien avec tous les acteurs du processus de création de valeur depuis le service de R&D qui pense et conçoit le produit jusqu'au client qui teste et avise les fabricants sur les améliorations à apporter et les personnalisations qu'il souhaite implanter au produit. Ce salarié devra composer avec une somme importante de données qui transitera depuis le monde virtuel jusqu'au monde réel au travers d'IHMs dédiées qui lui permettront de pouvoir effectuer les améliorations nécessaires à l'appareil productif pour qu'il puisse fonctionner et se reconfigurer de manière efficiente. Ce salarié possédera pour cela un nombre conséquent d'outils lui permettant de se former (FTLV, réalité virtuelle) et de s'adapter à des aléas de production (réalité augmentée, réseaux sociaux d'entreprise).

L'opérateur du futur ou l'opérateur 4.0 sera en interaction continue avec des machines collaboratives via des API spécialisées et naviguera dans un monde où réalité et virtualité s'interpèrent à l'ouverture sur le monde virtuel opérée par les systèmes cyber-physiques.

Section 2 Les systèmes cyberphysiques dans l'industrie

L'intérêt principal d'un système cyberphysique (CPS) est l'aptitude à pouvoir interagir et échanger des informations avec son environnement. Celui-ci doit donc posséder des briques technologiques dédiées pour pouvoir effectuer ce type d'actions. Monostori ([Monostori, 2014](#); [Monostori et al., 2016](#)) définit les systèmes cyberphysiques (CPS) comme des « *systems of collaborating computational entities which are in intensive connection with the surrounding physical world and its on-going processes, providing and using, at the same time, data-accessing and data-processing services available on the internet* ».

Klimeš ([Klimeš, 2014](#)), repris et adapté par Cardin ([Cardin, 2019](#)) proposent une architecture de ce que représentent les capacités d'un système cyberphysique (fig.8).

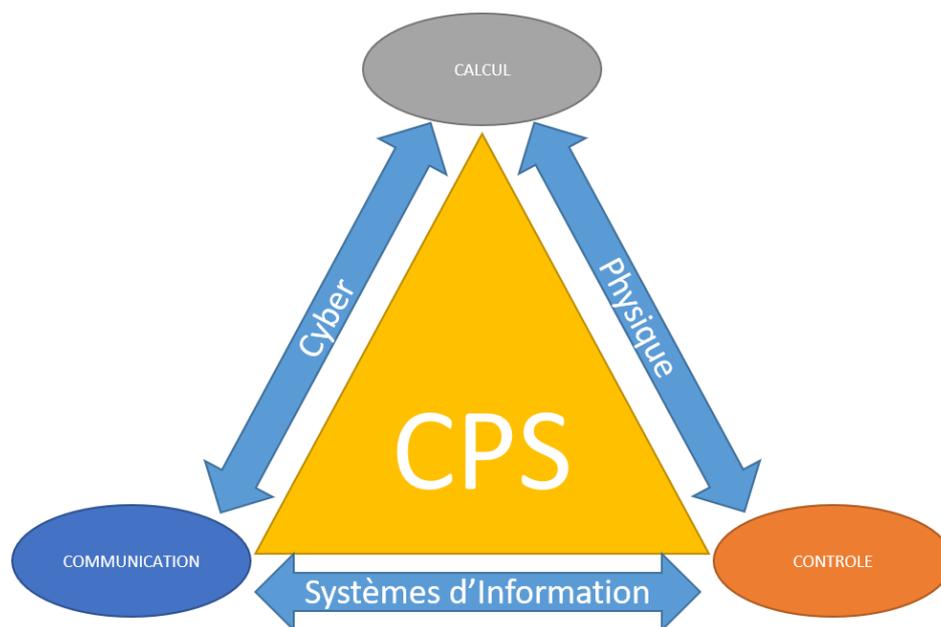


Figure 8: Un système cyber-physique selon Cardin ([Cardin, 2019](#)).

Celui-ci doit posséder trois briques fonctionnelles, l'une de calcul dans laquelle des algorithmes permettent d'instancier le comportement du système cyberphysique par rapport au monde physique et cyber perçu.

Cette structure d'instanciation est la fonction de contrôle du système, qui lui permet une relative réactivité et autonomie dans celle-ci en fonction de la teneur des algorithmes contenus dans la fonction calcul. En effet, une Intelligence Artificielle apprenante possèdera plus d'autonomie qu'un algorithme figé dans sa capacité à gérer les erreurs et les aléas. Le pouvoir de contrôle du CPS (système cyberphysique) sera aussi conditionné à sa capacité à recevoir des informations à jour provenant de l'appareil industriel. Les fluctuations de l'appareil productif influenceront sur la perception du CPS qui doit donc être « conscient » de son état à chaque instant, pour modifier son comportement si besoin. Les fonctionnalités matérielles du système sont donc primordiales pour « sentir » le monde physique.

La fonction de communication doit donc être parfaitement intégrée et fluide avec une communication directe (via, e.g., Wi-Fi, ou Bluetooth) et un langage commun entre tous les logiciels communicants. Ici, le domaine est corrélé aux *Systèmes d'Informations* qui doivent permettre un chaînage numérique cohérent et multilatéral, une connectivité efficace, par rapport aux différentes entités communicantes, dans l'intégration horizontale comme dans l'intégration verticale (voir [section 1 : Les postes de travail du futur](#)).

Du langage permettant de communiquer doit découler une modification du comportement du CPS qui est effectué dans le système de calcul de celui-ci. La latence du système, devient donc un gage de performance pour l'organisation qui déploie ce type de moyen. Finalement, la puissance de calcul du CPS (système cyberphysique), l'adaptation à son environnement, ce qu'il reçoit d'information comme ce qu'il émet de contrôle détermine son degré d'intelligence à savoir adopter la bonne réaction en regard de l'aléa rencontré en production. Ici, ce sont les caractéristiques logicielles qui régissent le système cyberphysique.

Un nombre important de technologies peuvent être considérées comme des systèmes cyberphysiques notamment l'Internet des Objets (IoT). Une quantité substantielle de domaines industriels, du bâtiment, du transport ou encore de l'agroalimentaire sont ou deviendront consommateurs de CPS dans le futur.

La définition des chercheurs dans le domaine est suffisamment large pour y faire entrer un nombre conséquent de technologies dont les caractéristiques sont proches de celles exposées précédemment. C'est notamment le cas des technologies immersives et interactives que sont les systèmes de réalité augmentée et de réalité mixte.

En effet, les technologies dites *HandHeld Displays* (HHD) et *Head-Mounted Displays* (HMD) ont tous les attributs nécessaires pour faire valoir le qualificatif de CPS : une unité de calcul qui effectue les opérations de suivi et de recalage des objets virtuels projetés sur le système de restitution (visuelle, auditive, haptique, etc.), un système de contrôle via l'Interface Homme-Machine intégré dans les dispositifs, mais aussi une batterie de capteurs divers (caméras RGB, infrarouge, centrale à inertie, etc...) pour « percevoir » leur environnement ; enfin des systèmes de communication avec l'extérieur, souvent une puce Wi-Fi, ou Bluetooth mais aussi un GPS. Les contenus dans les systèmes de calcul permettent, suivant leur complexité, d'effectuer des tâches plus ou moins complexes et possède une capacité relative à influencer sur leur environnement.

De par leur nature interactive, ces technologies pourront éventuellement assister l'Humain dans la complétion de ses tâches, notamment en réalisant les activités pénibles et/ou répétitives afin que l'individu puisse « *mettre ses fonctions cognitives au service de la qualité, de l'innovation et du déploiement du changement agile* » (Julien and Martin, 2018). Les briques constitutives de ces technologies 4.0 pourraient aussi être utilisées à bon escient afin de permettre l'inclusion de personnels ayant des handicaps physique et/ou mental dans un milieu industriel qui leur est largement fermé aujourd'hui. A cette fin, il est nécessaire d'interroger la constitution de ces technologies et les façonner pour qu'elles participent, à la flexibilité de l'appareil production, à la performance, à l'autonomie et à la responsabilisation des personnels, et à l'intégration des populations encore largement exclues.

L'architecture et le fonctionnement des différents blocs constitutifs d'un système de réalité augmentée sera explicité plus en détail dans le chapitre suivant. Ceux-ci seront classifiés en regard de leurs différences relatives et des particularités à l'usage. Puis, il sera effectué un vaste balayage de ce que les technologies permettent tant du point de vue matériel que du point de vue logiciel, les briques technologiques de calcul, de suivi et de recalage ainsi que les méthodes de restitution de l'information influençant grandement les performances à l'usage de ce type d'appareil.

Chapitre II : Architecture et caractéristiques des technologies de réalité augmentée et de réalité mixte

Section 1 Description et architecture d'un système de Réalité Augmentée

II.1.1 Une définition de la réalité augmentée

Le concept de réalité augmentée (RA) et ses représentations analogues (réalité mixte (Milgram and Kishino, 1994), réalité fusionnée (Kress and Cummings, 2017), réalité médiate (Mann, 1994)) souffrent toujours dans la Littérature scientifique comme dans sa perception auprès des fabricants de technologies immersives et interactives d'une part importante d'opacité. La multiplicité des appellations donne lieu à des batailles sémantiques chez les spécialistes (Speicher et al., 2019) comme chez les fabricants de technologies qui les utilisent comme arguments marketing pour vendre leurs produits. En effet, les manières de représenter l'ajout d'éléments virtuels dans un environnement réel ainsi que leur capacité à interagir avec celui-ci viennent influencer fortement sur la représentation que se font les chercheurs et les entreprises travaillant dans ce domaine.

Les termes de réalité augmentée et de réalité mixte (RM) naissent en 1994 quand Milgram et Kishino exposent le continuum des réalités. Selon eux, ce continuum est construit autour de deux extremums, réalité pure d'une part, virtualité complète d'autre part (fig.9). Entre les deux se situe le domaine de la réalité mixte où les éléments virtuels et réels coexistent au sein de l'environnement de l'utilisateur. Et selon que l'on est plus proche de l'un ou de l'autre extremum, on navigue soit dans un monde de réalité augmentée (RA) (une majorité d'éléments réels cohabitants avec une plus petite partie de corps virtuels), soit dans un monde de virtualité augmentée (VA) ; une majorité d'éléments virtuels sur lesquels viennent s'imbriquer des éléments de la réalité, soit dans un monde virtuel (RV).



Figure 9: Le continuum des réalités. D'après (Milgram and Kishino, 1994).

De cette première classification ont émergé des systèmes taxinomiques toujours plus complexes pour classifier les différentes technologies immersives et interactives qui seront exposés au paragraphe II-1.1. Il est aussi né un nombre conséquent de terminologies supplémentaires venant greffer des spécificités matérielles et/ou logicielles à cette réalité mixte afin d'en créer de nouvelles [réalités]. Ces nouvelles réalités seront décrites au paragraphe II-1.2. Enfin, nous affirmerons notre positionnement vis-à-vis de tous ces systèmes de classification dans le paragraphe II-1.3.

II.1.1.1 Quelques taxinomies relatives au continuum des réalités

De nombreuses taxinomies ont été tentées pour décrire les technologies immersives et interactives. Certaines globalisantes axées sur la discrimination des technologies par

rapport à leurs caractéristiques matérielles (Havard and Baudry, 2019; Syberfeldt et al., 2017). Ces classifications sont basées principalement sur les modalités visuelles d'augmentation. D'autres classifications basées sur les interactions entre l'Homme et la machine ont été proposées par (Dubois et al., 1999; Dubois and Nigay, 2000; Beaudouin-Lafon, 2000; Dubois et al., 2003; Benford et al., 2005; Jacob et al., 2008). Enfin, certaines plus fonctionnelles, classent les technologies via les usages pouvant être fait à l'aune de certains critères techniques. Ainsi, Normand et alii (Normand et al., 2012a) considèrent le type d'augmentation, le système de suivi et la temporalité comme moyen de classer les dispositifs. Flavián et alii (Flavián et al., 2019) explorent les champs de l'interactivité de l'appareil, du concept de présence et du caractère intrusif du dispositif par rapport à l'Humain. Il existe par ailleurs nombre d'autres classifications se rapportant à l'augmentation d'autres sens Humain notamment le domaine kinesthésique (Bayart and Kheddar, 2006).

Ces classifications sont certes correctes mais soient elles n'embrassent pas le spectre entier des augmentations possibles en prospectant le domaine visuel uniquement, soient elles sont très précises et valables uniquement pour quelques dispositifs identifiés (Roudaut and Lecolinet, 2007). Pour être complet, il faudrait définir une classification qui permettrait d'embrasser l'ensemble du spectre des augmentations sensorielles possibles tout en omettant pas les possibilités offertes par les dispositifs par rapport à des cas d'usage. Une classification des matériels seuls ne caractérise pas le domaine, il faut aussi proposer une taxinomie des applications afin de pouvoir dégager les grandes lignes des attendus, matériels comme logiciels, auxquels devront répondre les technologies pour pouvoir satisfaire un besoin. Nous proposons une classification à la [partie TROIS, chapitre II, section 2](#) de ce manuscrit.

II.1.1.2 De nouvelles réalités ?

La réalité médiante a été définie par Mann (Mann, 1994) comme une réalité englobant les autres réalités que sont les réalités virtuelle, augmentée et mixte (pour une définition du terme *médiate* et du choix de ce terme pour la traduction française, voir le glossaire). Pour Mann, l'ajout de capacités logicielles telles que la diminution des objets réels dans l'espace par des éléments virtuels, mais aussi l'augmentation, le renforcement ou encore l'altération (l'auteur ne précise pas comment se matérialisent ces concepts) sont des caractéristiques de ce qu'il appelle la réalité médiante. Il ajoute à son propos que les différences résultantes entre RV, RA et RM [*id est* : M pour Médiate] sont fonction de l'analyse suivante qu'il illustre à travers la figure 10.

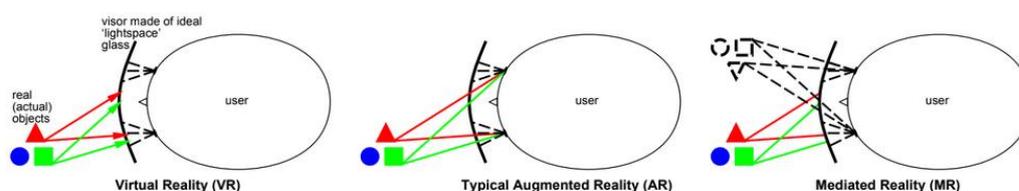


Figure 10: La différenciation entre RV, RA et Réalité Médiate pour Mann (Mann, 1994).

Un individu percevrait le monde extérieur via un hypothétique écran qu'il nomme « *lightspace* » *glass*. Dans le cas de la RV, cet écran absorberait les rayons lumineux provenant des objets réels (lignes pleines) et des caméras viendraient ajouter les éléments virtuels sur l'écran hypothétique. L'auteur évoque typiquement le type de RA que nous pouvons obtenir par l'intermédiaire de visiocasques *Video See-Through* tels que les Lenovo (fig.12(a)) ou encore le HTC Vive Pro (fig.12(b)) ou bien les technologies mobiles de type smartphone/tablette qui fonctionnent sur le même principe de captation indirecte de la scène réelle

La réalité augmentée est présentée comme une surimpression d'éléments virtuels projetés sur l'écran hypothétique et qui viendraient se marier avec les rayons lumineux provenant des objets physiques qui eux, seraient captés par les caméras. Mann évoque là les technologies de type HMD *Optical See-Through* dont l'Hololens 1 (fig.113(a) et l'Hololens 2 (fig.113(b)) sont des représentants.

Mann considère la réalité médiate comme fonctionnant de la même manière que la réalité virtuelle avec la projection par les caméras du dispositif d'éléments virtuels sur la scène elle-même, peut-être à des fins de diminution, d'altération ou de renforcement de la réalité comme il le décrit lui-même sans en préciser les détails d'exécution.

La réalité médiate semble avoir été nommée par le fait que l'écran hypothétique, le « *lightspace* » glass, joue un rôle prépondérant d'intermédiaire dans toutes les situations, RA, RV, ou RMédiate. La réalité médiate embrasse tous les champs du possible dans la concaténation des éléments virtuels avec les éléments réels dans une scène. C'est ce que viennent confirmer (Parveau and Adda, 2020) par l'intermédiaire de leur graphe présenté en figure 11.

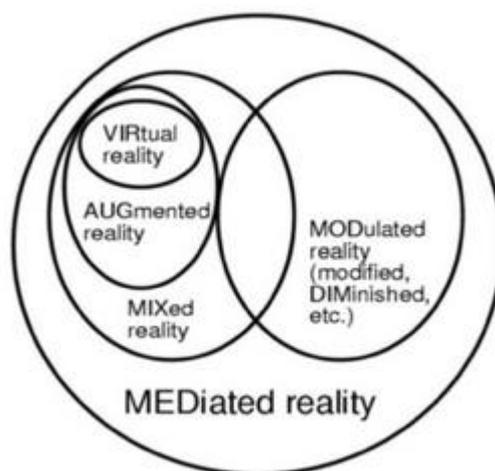


Figure 11: Le modèle de réalité médiate synthétisé par (Parveau and Adda, 2020).

Le graphe en figure 11 présente d'ailleurs un intérêt particulier dans la considération que nous nous faisons des différents concepts de réalités. Celui-ci montre une réalité modulée comme des éléments algorithmiques de diminution, modification (lien avec l'altération de Mann ?), etc., considérés par les auteurs comme ne faisant pas partie de la réalité augmentée. Cette considération nous la rejetons en ce sens que nous percevons cette considération comme la marque d'une analyse **technocentrée**. En effet, une diminution de la scène par le dispositif (e.g. un objet réel caché par l'algorithme afin que l'utilisateur puisse percevoir un point d'intérêt caché par cet objet) est une augmentation de l'Humain en ce sens qu'il peut ainsi avoir une perception accrue de son environnement, que ce soit par l'ajout d'information utile ou le retrait d'information inutile. Notre point de vue est **anthropocentré**, car de celui-ci, la réalité augmentée est un concept qui sert l'humain à mieux cerner son environnement pour interagir plus efficacement avec lui. En cela, toute forme d'augmentation de ses perceptions (augmentation, diminution, altération, modification, renforcement) sont des augmentations de sa réalité et donc de la réalité augmentée.

On trouve aussi le terme de réalité fusionnée. L'appellation réalité fusionnée a pour origine les travaux de développement du visiocasque Hololens 1 par Microsoft Corporation. Kress et Cummings (Kress and Cummings, 2017) considèrent la réalité fusionnée comme une réalité produite par des visiocasques video see-through, soit donc des visiocasques de réalité virtuelle possédant un ensemble de caméras stéréoscopique

sur le devant des lunettes (figure 12(a) et (b)), en opposition avec des visiocasques Optical See-Through, dont font partie les Hololens (fig.113(a) et (b)).

De surcroît, la différence entre réalité mixte et réalité fusionnée est caractérisée, selon les deux experts, par la capacité que posséderait les appareils de réalité mixte à générer des cartes de profondeur et à comprendre leur environnement (**Kress and Cummings, 2017**; **Parveau and Adda, 2020**). Cette compréhension de leur environnement ne peut être possible que grâce à une batterie de capteurs dédiés à cette fonctionnalité.



Figure 12: Systèmes de RV permettant la RM, (a) Lenovo, (b) HTC Vive Pro, et ne permettant pas la RM, (c) Oculus Go.

Les différences perçues et explicitées par certains professionnels, développeurs de solutions logicielles ou fabricants de visiocasques, concernant la réalité augmentée et la réalité mixte peut parfois sembler déroutante. Microsoft Corporation définit⁴ la réalité mixte comme une application possédant les caractéristiques suivantes :

1. Compréhension de l'environnement : mappage et ancrages spatiaux.
2. Compréhension de l'humain : suivi manuel, suivi oculaire et saisie vocale.
3. Son spatial.
4. Localisations et positionnement dans les espaces physiques et virtuels.
5. Collaboration sur des ressources 3D dans les espaces de réalité mixte.

La firme américaine définit donc la réalité mixte comme très dépendante des caractéristiques du dispositif associé : batterie de capteurs pour percevoir l'environnement et l'Humain (points 1 et 2), un système permettant de spatialiser le son (point 3), enfin des caractéristiques logicielles permettant de générer des ancres dans l'espace virtuel et/ou le monde tangible (point 4) et la collaboration entre tous les individus au sein de cet espace réel/virtuel (point 5). Finalement, la réalité mixte selon Microsoft résume assez bien les spécificités proposées par l'appareil de réalité augmentée qu'il commercialise, l'Hololens.

Un autre exemple de caractérisation de la réalité mixte par rapport à la réalité augmentée provient d'un développeur d'une solution logicielle française : Spectral TMS. Le professionnel décrit⁵ la différence entre les deux concepts par la phrase : « *La Réalité Mixte utilise un casque ou des lunettes alors que la Réalité Augmentée est basée sur l'utilisation de tablettes ou smartphones* ». Spectral TMS associe donc le support de visualisation comme moyen de différenciation entre la réalité augmentée et la réalité mixte. Ici encore, cette caractérisation leur permet de souligner l'apport de leur produit

⁴ <https://docs.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/discover/mixed-reality>

⁵ <https://www.spectraltms.com/blog/quest-ce-que-la-realite-mixte>

commercialisé, une solution logicielle dédiée aux visiocasques Hololens, par rapport à la concurrence.

II.1.1.3 Une proposition de taxonomie

Les différentes taxinomies exposées précédemment n'apportent pas d'éléments probants de distinction entre les technologies, et sont de surcroît très technocentrées. Quant aux taxinomies commerciales, elles ne sont basées que sur la volonté de mettre en exergue le dispositif vendu et souffrent donc d'arguments commerciaux sous-jacents forts peu à propos. Nous basons donc notre définition de la réalité augmentée et de la réalité mixte sur la base de ce qui a précédemment été défini par Milgram et Kishino (**Milgram and Kishino, 1994**).

Nous considérons la réalité mixte comme une possibilité de se déplacer dans le continuum des réalités en passant d'une réalité où l'on naviguerait principalement dans un environnement réel augmenté d'avatars virtuels (RA) à des réalités plus synthétiques où le monde virtuel serait prépondérant (VA, RV). Cette fluidité de déplacement dans ce continuum est rendue possible par des dispositifs spécialisés ou transverses qui posséderait des briques technologiques permettant de naviguer dans ce continuum. Par exemple, un appareil de réalité virtuelle tels que ceux présentés en figure 12(a) et 12(b), couplés à une suite logicielle développée à cette fin, pourraient combler ce besoin. L'utilisation de ce type de dispositif fait émerger d'autres difficultés comme la latence dans le cas d'une utilisation en réalité augmentée ou encore, dans le cas de l'HTC Vive (fig. 12(b)), l'impossibilité de se déplacer au-delà d'une zone définie par les capteurs externes à ce dispositif et qui limite la zone d'utilisation de cet appareil à une utilisation de réalité augmentée mobile étendue. Ces cas particuliers de limitations technologiques seront abordés plus largement dans la section 2 de ce chapitre.

Nous percevons la réalité augmentée comme une brique particulière de la réalité mixte où des éléments virtuels viennent se superposer au monde tangible par le truchement d'un dispositif dédié (fig.28). Ces éléments virtuels ont différentes caractéristiques :

- Géométriques.
 - Des éléments en 3D ou en 2D pouvant avoir diverses représentations : des Humains, des objets, des schémas, des formes abstraites ;
 - Des masses et des dimensions variables.
- Comportementales.
 - Animés ou non ;
 - Dynamiques ou statiques ;
 - Possédant une réflectance influant sur leur visibilité dans le dispositif de visualisation ;
 - Communiquant ou pas avec son environnement, avec les machines et avec les individus.
- Interactives.
 - Manipulables ou non, *affordants* ou pas ;
 - Manipulation à distance, par préhension ou les deux.

Ce dispositif peut avoir des caractéristiques matérielles et logicielles multiples. Ces caractéristiques permettent une *expérience utilisateur* plus ou moins concluante en fonction des spécificités de la machine et de la solution logicielle associée. Cette expérience utilisateur peut être vécue via plusieurs types de dispositifs différents : visiocasques, tablettes/smartphones, projecteurs de profil ou bien écrans déportés. L'appareil doit cependant posséder une batterie de fonctionnalités que nous détaillons

dans le paragraphe suivant afin de satisfaire à la définition que nous nous faisons, d'un système de RA en particulier, et d'un CPS (système cyberphysique) plus généralement.

II.1.2 Architecture d'un système de réalité augmentée

Dans son article de 1997, Azuma ([Azuma, 1997](#)) définissait un système de réalité augmentée comme un système possédant trois caractéristiques :

- Combine le réel et le virtuel ;
- Interactif en temps réel ;
- Recale les éléments en 3D.

La complétion de ces trois caractéristiques nécessite un système de calcul (1^{er} module fonctionnel) permettant de générer le mix réel/virtuel. Ce dernier affichant les éléments virtuels en trois dimensions dans le système de visualisation du système (2nd module fonctionnel). Cette génération ne peut être rendue possible que grâce à une fonction permettant au système de voir et de positionner les éléments virtuels dans l'environnement (3^{ème} module fonctionnel). Enfin, une interface pour interagir avec le système (4^{ème} module fonctionnel). Azuma précise que cette interface peut être multimodale : des moniteurs, des systèmes monoculaires ou encore des HMD (Head-Mounted Displays) transparents. L'auteur n'explique cependant pas comment il permet une visualisation en 3D avec l'association d'une interface sur un dispositif en 2D tel qu'un moniteur. De plus, un dispositif interactif et combinant des éléments réel/virtuel en 2D tel qu'un projecteur de profil n'est pas considéré comme un système de réalité augmentée dans sa définition. Même remarque à propos d'une projection d'éléments 2D dans un visiocasque HMD. Nous n'entrevoions pas l'élément en 3D comme le seul vecteur d'augmentation de la réalité, spécialement si l'élément 3D se retrouve nivelé par le truchement de sa visualisation au travers d'un système ne permettant qu'une version aplanie, ou en perspective, de celui-ci.

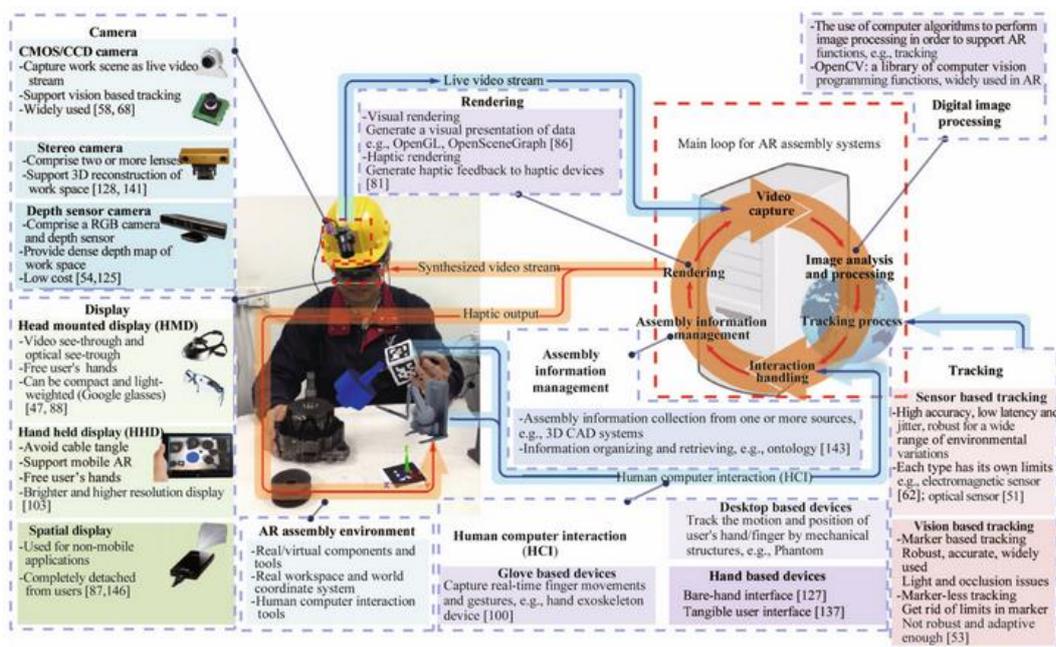


Figure 13: Classification d'une technologie de RA selon Wang et alii.

Wang et alii ([Wang et al., 2016](#)) caractérisent un système de réalité selon six modules (fig.13), formant une boucle : la capture vidéo, analyse et traitement de(s) l'image(s), suivi et recalage du système, traitement des interactions, gestion des informations (d'assemblage), et rendu.

Pour les auteurs, la complétion de la fonction de capture vidéo est effectuée via des caméras photographiant l'environnement à chaque boucle d'instanciation algorithmique de recalage des éléments virtuels sur la scène par des caméras pouvant être de simples capteurs CMOS ou systèmes plus complexes comme des caméras stéréoscopiques ou encore des couplages de caméras RGB (Red-Green-Blue) et de capteur de profondeur permettant la génération de cartes de profondeur (depthmaps). L'image est ensuite traitée dans le module suivant par des bibliothèques algorithmiques dédiées. La position dans l'espace et les positions angulaires associées sont traitées par l'intermédiaire d'un ensemble de capteurs (accéléromètre, gyroscope, IMU) et de fonctions algorithmiques. Il existe plusieurs méthodes de suivi et de recalage. Celles-ci seront explicitées en section suivante. Les interactions de l'Humain avec la machine sont transférées via le lien fait entre le dispositif interactif et le module fonctionnel de traitement des informations provenant de la scène. Le gestionnaire des informations fourni alors les bonnes ontologies/données à renvoyer au dispositif de RA utilisé par l'individu. La fonction de *rendering* effectue les opérations de rendus appropriées (haptiques, sonore, visuelles...).

Par ailleurs, les auteurs considèrent des flux de données entrants (fig.13, en bleu) au niveau des interactions Homme-Machine, de la caméra de capture de la scène, et du système de suivi. Enfin, des flux de données sortants (fig.13, en orange) dans lequel le rendu de la scène apparaît dans le dispositif de RA.

Pour les auteurs, la décomposition d'un système de RA est étroitement liée aux fonctions logicielles de celui-ci. La boucle est d'ailleurs cantonnée au monde cyber (fig.13, cadre rouge) par rapport aux éléments tangibles, capteurs et actionneurs, outils et machines, créatures et Humains, qui ont un rôle secondaire (fig.13, cadres mauves). De plus, la vision de ce type de décomposition est largement dissociée du contexte de travail et de l'utilisateur.

Selon nous, la décomposition d'une technologie de réalité augmentée se matérialise en cinq modules fonctionnels :

- **Fonction Calcul** : Elle gère l'essentiel du travail dans l'espace cyber. Reposant sur la puissance de calcul du CPU, et les capacités de la mémoire du dispositif, ses objectifs sont :
 - Traitement des données de suivi en entrée ;
 - Communication avec l'IoT et les logiciels associés (CAO, GPAO) ;
 - Recalage des informations en fonction du contexte ;
 - Analyse et traitement des données (visuelles, auditives, ...) à restituer.
- **Fonction Suivi** : Basé sur les méthodes implantées pour effectuer le suivi et le recalage des éléments virtuels dans l'environnement des utilisateurs, cette fonction fournit un référentiel de base à partir duquel la fonction calcul viendra effectuer les transformations relatives au bon positionnement des informations rendues en sortie.
- **Fonction Captation** : Rendue possible grâce à des capteurs installés sur l'appareil de réalité augmentée. Elle peut fournir des informations pour comprendre l'environnement. Les capteurs installés peuvent être multiples : caméras, accéléromètre, gyroscope, magnétomètre, etc...
- **Fonction d'Interface** : L'interface Homme-Machine permet une communication bilatérale entre les deux entités. L'Humain envoie des ordres à la machine qui reconnaît cet ordre (Humain vers Machine = reconnaissance). Après traitement, la machine renvoie des informations à l'Humain qui les comprend et les utilise dans le cadre de ses tâches (Machine vers Humain = retour d'information).
- **Fonction Restitution** : Cette fonction utilise les moyens à sa disposition pour véhiculer l'information à l'Humain. Ces moyens peuvent être visuels, auditifs,

etc.... Cette fonction dépend du calcul effectué en amont par le GPU de la machine et de la puissance des algorithmes de traitement des données associés.

Ces cinq fonctions peuvent associer des spécificités matérielles à des fonctionnalités logicielles. Par exemple, la fonction de restitution associe le système de restitution, le sens augmenté (kinesthésique, visuel, auditif, olfacto-gustatif) du point de vue matériel (e.g. bras haptique, écran holographique, haut-parleurs) avec des techniques logicielles (e.g. spatialisation du signal sonore, rendu visuel par *ombrage de celluloïd*, aussi nommé *cel shading* en anglais).

L'imbrication de ces fonctions générant une expérience de réalité augmentée procède d'un processus itératif dont se dégagent trois étapes :

1^{ère} étape : Détection de la Situation : Le système prend connaissance du contexte.

Cette étape se déroule dans le monde physique.

2^{ème} étape : Traitement de la Situation : Les fonctions intégrées au système permettent de traiter cette situation et de renvoyer une(des) information(s) en fonction de ce contexte et des moyens à disposition à l'Humain dans ce contexte.

Les opérations de traitement se déroulent dans le monde cyber.

3^{ème} étape : Retour d'Information : Les informations sont fournies par la machine à travers un ou plusieurs canaux sensoriels à l'Humain qui les comprend et interagit en regard de ceux-ci.

Ce retour d'informations s'effectue dans le monde physique.

Les modules fonctionnels de notre classification technologique, les étapes du processus de génération d'une expérience utilisateur et les interactions entre le monde cyberphysique sont illustrés dans la figure 14 :

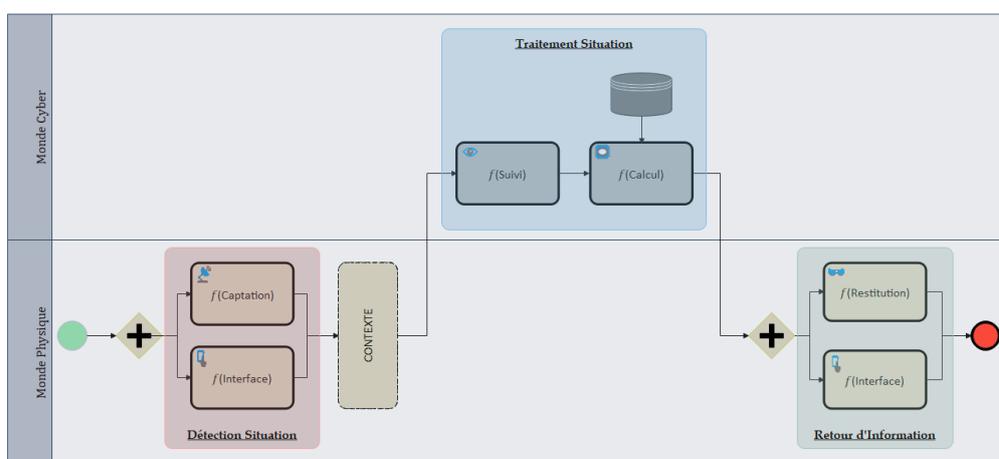


Figure 14: Notre classification d'une technologie de RA avec lien avec les CPS (diagramme BPMN des échanges entre mondes).

Nous pouvons dorénavant lier notre classification à la représentation faites par Klimeš (Klimeš, 2014), reprise et adaptée par Cardin (Cardin, 2019) déjà exposée au chapitre premier de la partie une et qui exposait le triptyque conceptuel de caractérisation d'un système cyberphysique (fig.15).

Les trois pôles technologiques d'un CPS peuvent être exécutées par la fonction Calcul pour l'Intelligence du CPS, par la fonction d'Interface du système de RA pour le pôle Contrôle, par la fonction Restitution du dispositif de RA dédié (un bras haptique, un visiocasque, une tablette, etc.) pour le pôle Communication.

La communication dans le monde cyber entre le pôle Communication et le pôle Calcul est rempli par la fonction Suivi permettant le recalage des éléments de restitution. La communication entre les pôles Calcul et d'Interface est réalisée principalement par les capteurs embarqués dans le dispositif de RA lui-même (la fonction Captation). Enfin, le système d'informations de l'entreprise permet la communication entre l'Homme et les machines en temps réel via l'Internet des Objets ou les systèmes d'intégration verticale et/ou horizontale.

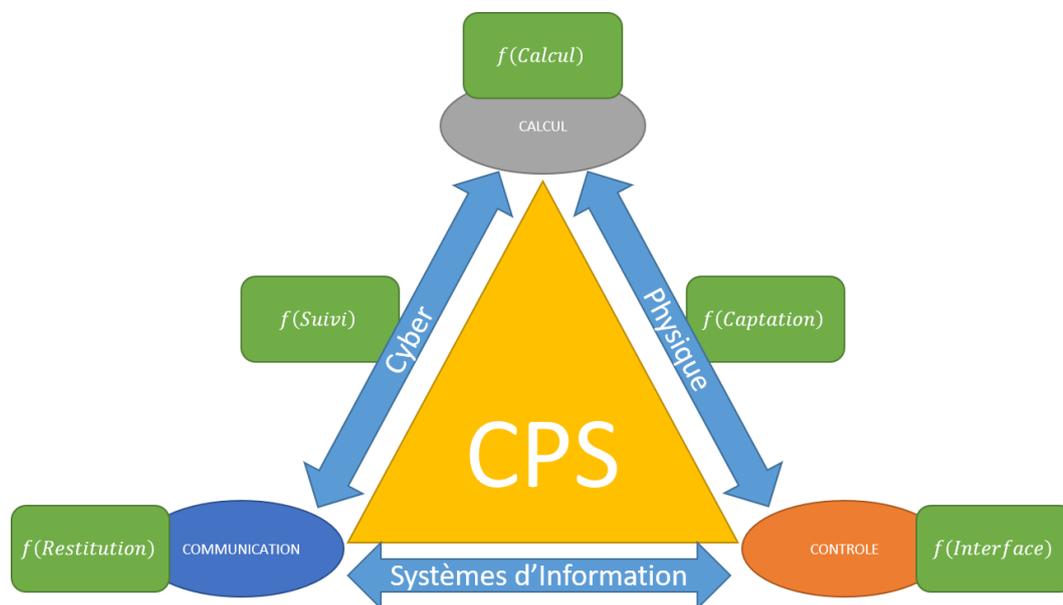


Figure 15: Notre classification des technologies de RA vis-à-vis des pôles constitutifs d'un CPS.

Le paragraphe suivant illustre la manière dont se matérialisent les différentes fonctions composant une technologie de RA au travers d'un exemple.

II.1.3 Un système de réalité augmentée - Le Microsoft Hololens 1^{ère} génération

Le Hololens 1 est un dispositif de RA de type HMD (visiocasque) Optical See-Through possédant une architecture de type casque à arceau à porter sur la tête. Cet arceau se serre sur le périmètre du crâne de l'individu grâce à une molette située à l'arrière du visiocasque (fig.16).

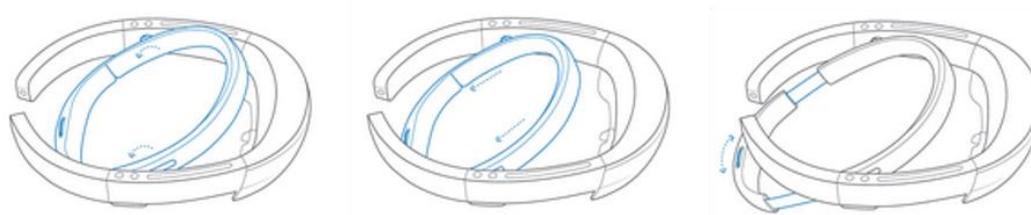


Figure 16: Montage du casque HMD Hololens 1. Documentation Microsoft.

La fonction Calcul de l'Hololens 1 est assurée par un CPU Intel Atom cadencé à 1,04GHz possédant une architecture x86 (32bits) associé à 2GB RAM, un GPU de 2GB RAM, et un espace mémoire de 64Go.

La partie connectivité du dispositif se compose, elle, d'une fiche Micro USB 2.0, d'un connecteur Bluetooth 4.1 LE et d'une carte Wi-Fi 802.11ac pour la mobilité. La réactivité du système exposée au [chapitre premier, section 2](#) est fortement corrélée aux performances pouvant être atteinte par la fonction calcul de notre dispositif (fig.17).



Figure 17: Le système de Calcul de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.

La fonction Captation (fig.18) est garantie par une batterie de capteurs divers. Une **unité de mesure inertielle** (IMU pour *Inertial Measurement Unit* en anglais) ou **centrale à inertie** assure les capacités du dispositif à naviguer dans l'environnement physique où l'individu évolue. Un capteur de luminosité, un capteur de profondeur, une caméra RVB, et quatre LEDs Infra-Rouge (IR) complètent le dispositif de reconnaissance de l'environnement.



Figure 18: La fonction Captation de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.

Enfin, 4 caméras RVB placées sur les côtés de l'appareil servent à récupérer les données d'entrée utiles à la fonction suivante : la fonction Suivi.

La fonction Suivi de l'Hololens est principalement assurée par sa capacité à cartographier son environnement en 3D. Cette méthode nommée SLAM ([voir partie UNE, chapitre II, section 2](#)) est rendue possible grâce au système composé de caméras RVB et des LEDs IR (que nous évoquions juste au-dessus). Des méthodes de suivi basé sur des marqueurs ou des marqueurs naturels peuvent toutefois remplacer ou compléter les capacités natives de l'Hololens 1.

La fonction d'Interface est rendue possible grâce à des capteurs de détection des gestes de la main, mais aussi via des microphones et un algorithme de reconnaissance vocale,

enfin grâce à un système de suivi de la tête. Ce dernier est d'ailleurs corrélé aux caméras latérales qui, couplées à la fonction Suivi et à la fonction Calcul permettent de suivre les mouvements de tête effectués par les individus à l'usage du dispositif.

Enfin, la fonction Restitution fait l'objet dans (Kress and Cummings, 2017) d'un long développement. Nous synthétiserons donc les propos des experts.

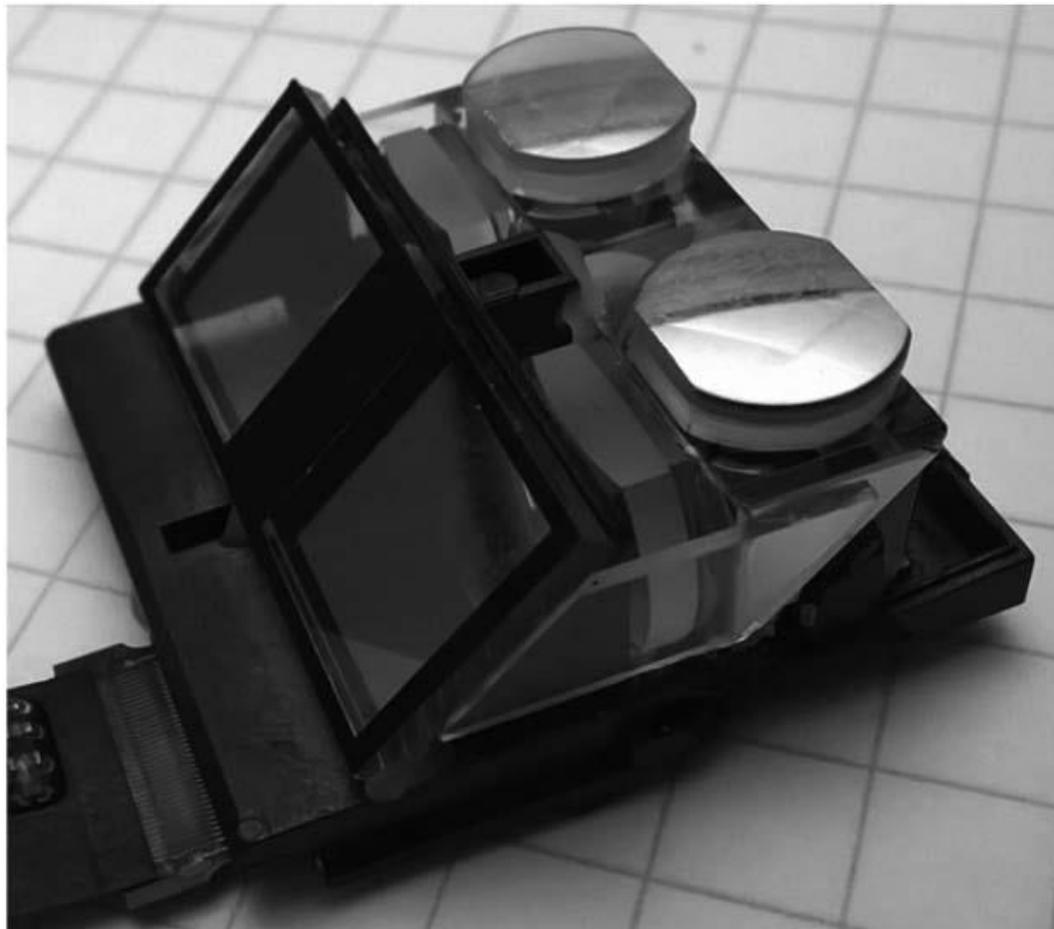


Figure 19: L'ensemble lentilles et écrans de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.

Cette fonction est assurée en premier lieu par un processeur HPU (*Holographic Processing Unit*) de 1GB de RAM. Ce processeur est couplé à deux moteurs d'affichage HD 16:9 et à des lentilles holographiques à guide d'ondes qui projettent des hologrammes sur des écran LCoS de 0,57" de diagonale. Le champ de vision (FoV pour *Field of Vision*) résultant est de 34° pour l'Hololens 1. La distance inter-pupillaire est assurée par un étalonnage automatique non mécanique que l'on voit partiellement à la figure 19 (dans le coin inférieur gauche).

On peut s'apercevoir dans l'exemple de l'Hololens 1 que les capacités des technologies de RA sont fortement corrélées aux systèmes constitutifs de celle-ci. Ainsi, l'architecture de l'appareil, les performances des éléments de la fonction calcul, ou encore la construction du système de restitution vont influencer méliorativement ou péjorativement sur les performances et le confort globaux du dispositif. Ces limites seront explorées dans la section suivante de ce même chapitre.

Section 2 Spécifications et fonctionnalités de la Réalité Augmentée

Diverses solutions de réalité augmentée ont été testées, au travers d'essais en industrie (**Funk et al., 2017**; **Blanco-Novoa et al., 2018**; **Bode, 2019**) et d'expériences en laboratoire (**Ferrati et al., 2019**; **Pusch and Noël, 2019**) et ce, à de nombreuses reprises. Bon nombre de limites ont été relevées lors de ces expérimentations.

Par exemple, Funk & alii (**Funk et al., 2017**) relèvent de leur expérience des limites sur la précision des capteurs du système, une augmentation la charge cognitive pour les utilisateurs, enfin un processus de calibration contraignant. Le test d'assemblage permettait la comparaison entre des individus novices et des individus expérimentés. L'utilisation du système de RA rend les novices quasiment aussi productifs que les « experts » (88,65s contre 74,34s) tandis que l'absence du système rend les néophytes bien moins productifs que ces derniers (113,62s contre 72,67s).

Blanco-Novoa & alii (**Blanco-Novoa et al., 2018**) ont expérimentés deux systèmes dits HandHeld et un visiocasque dans un navire en construction. L'objectif était de tester les capacités des technologies à détecter les marqueurs présents à l'intérieur du bâtiment afin de mesurer leur capacité à se repérer en milieu fermé et peu lumineux. Les résultats montrent que les dispositifs HandHeld ont une excellente détection des marqueurs binaires à partir de 220 lux sur une distance comprise entre 6 et 25m. Les QR-Codes sont en revanche mal détectés, la distance de détection étant comprise entre 0,38 et 1,3m à 280 lux. Par ailleurs, l'angle de détection maximum ne doit pas être supérieur à 30° dans toutes les conditions. Le visiocasque est moins bon, il ne détecte les marqueurs binaires à 280 lux qu'à une distance comprise entre 5,7 et 12,60m. De plus, il est noté qu'à partir de 160 lux, les marqueurs sont mal suivis et recalés par le système de RA. Enfin, les QR-Codes ne sont détectés qu'entre 35 et 67cm sous n'importe quelles conditions lumineuses.

Ferrati & alii (**Ferrati et al., 2019**) ont comparé les effets de cybercinétose (*cybersickness*), le taux d'apprentissage, l'expérience utilisateur, la vitesse d'exécution de la tâche et son taux d'erreurs associé pour un dispositif Head-Mounted Display (un Microsoft Hololens 1^{ère} génération), par rapport à un mode opératoire papier, sur un poste d'assemblage. Les résultats montrent de faibles effets de cybermalaise (val.moy. : 0,4/4), un apprentissage des tâches très élevé (val.moy. : 3,4/4), une expérience utilisateur élevée (val.moy. : 3/4), une vitesse d'exécution plus rapide (28s contre 35,6s), enfin, un taux d'erreurs plus faible pour le dispositif RA (1,2 erreur moyenne contre 2,6). Cependant, des problèmes d'interaction avec les hologrammes ont été quasiment systématiquement relevés et des problèmes de suivi et de recalage des éléments ont été constatés.

Pusch & Noël (**Pusch and Noël, 2019**) ont effectué des comparaisons de différentes technologies de RA (HMD, HHD, écran statique déporté) et ont mesuré les performances et le ressenti des utilisateurs en regard de chacun des technologies. Les problématiques principales qui ont émergées sont des difficultés à interagir avec le système HMD, une faible ergonomie (masse élevée, enfin, un champ de vision très limité. D'un autre côté, les performances furent jugées bonnes, et l'utilisation mains libres considérée comme un facteur clé de succès. Le système HHD, fut critiqué sur son champ de vision, et les performances au poste jugées mauvaises. L'autonomie et la facilité d'utilisation étaient en revanche considérées comme bonnes. Enfin, l'écran déporté disposait, selon les participants, d'un système de suivi plutôt pauvre et jouissait de performances limitées. Le confort visuel était cependant considéré comme bon et l'utilisation mains libres jugée comme bienvenue.

Par ailleurs, les qualités ergonomiques peuvent être facteur d'aggravation de l'expérience utilisateur. Yan & alii (**Yan et al., 2019**) ont mesuré l'impact de l'architecture de maintien de visiocasques sur la tête de participants. Ils ont ainsi fait varier différents types de maintien des casques (fig.20).



Figure 20: Trois types d'architecture de casques mesurés. A gauche, le visiocasque (a), au milieu le casque (b), à droite le casque (c). D'après Yan & alii (Yan et al., 2019).

Plusieurs masses de visiocasques ont été testées (100g, 300g, 500g et 700g). Le confort de port a été mesuré à l'aide de l'échelle CR-10 de Borg. Celui-ci résultait de l'architecture de maintien du visiocasque. Les résultats montrent que l'architecture (c) possède la meilleure évaluation subjective par les participants (fig.21) devant le type de maintien (a) et enfin, le plus inconfortable (b).

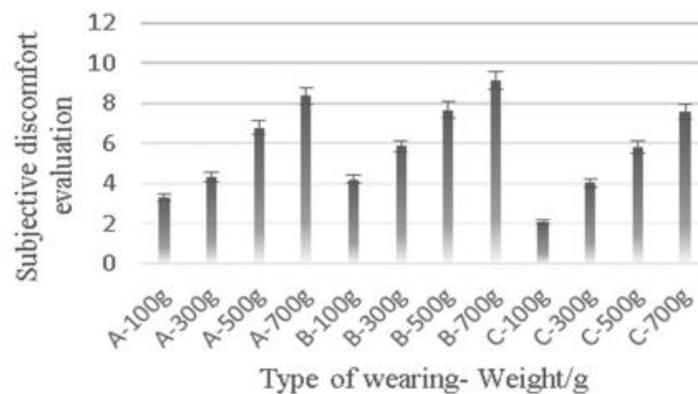


Figure 21: Évaluation du confort de port des visiocasques selon leur masse et leur architecture. D'après (Yan et al., 2019).

Les auteurs ont par ailleurs mesuré les masses pour chaque os du crâne (l'arête du nez, sourcils, front, os temporal, sommet de la tête, arrière de la tête, pommettes). Ces mesures révèlent une mauvaise répartition des masses pour les architectures (b) et (c). L'architecture (a) permet une répartition plus équitable de l'ensemble des masses entre l'avant et l'arrière du crâne. Finalement, les auteurs notent une corrélation forte entre la masse de l'appareil, la perception du confort par l'utilisateur et la répartition des masses par l'intermédiaire de l'architecture de port du dispositif. Ce constat a été analysé puis corroboré par Zhuang & alii (Zhuang et al., 2019) après expérimentation sur des dispositifs commerciaux. La qualité de l'architecture du dispositif revêt une importance considérable, surtout si ce dispositif est porté par l'individu comme le sont les visiocasques.

Ces quelques exemples mettent en exergue les limites que l'on peut observer dans un nombre conséquent d'autres publications. Nous explicitons celles-ci en les classant par fonction afin de corrélérer avec notre classification.

II.2.1 Fonction Suivi

La fonction Suivi est une fonction essentielle pour un système de réalité augmentée. Celle-ci est composée de deux algorithmes associés : le suivi et le recalage. Sans ces deux algorithmes, l'augmentation du champ de restitution à l'individu serait telle une photo

prise à l'instant $t=0$ qui ne s'adapterait jamais au contexte évolutif de la scène. Les algorithmes ont donc pour objectif de prendre en compte les mouvements, effectués par le(s) individu(s), les objets de la scène réelle, etc., et d'appliquer les corrections nécessaires pour ajouter les éléments de restitution permettant de générer une scène de réalité augmentée.

L'algorithme de suivi traque la scène à augmenter. L'algorithme de recalage permet de repérer le même objet dans la même scène. A $t=1$, le recalage utilise les coordonnées spatiales de l'objet à $t=0$ pour chercher l'objet dans la scène sans parcourir l'intégralité de l'image. Pour que celui-ci soit efficace, une faible latence est nécessaire permettant une efficacité et une précision correcte dans le repérage de l'objet dans la scène. Bien connaître la vitesse de l'objet suivi si celui-ci en possède une ou de connaître la vitesse de déplacement de l'individu est une autre exigence. Pour cela, les algorithmes de recalage utilisent les capteurs de la fonction Captation pour évaluer les vitesses, les mouvements angulaires, etc. La Littérature ne dissocie pas forcément les deux termes, mais les concatène en un terme plus générique : le suivi. Ce suivi possède deux architectures matérielles possibles et quatre méthodes logicielles.

Les deux types principaux de suivi qui conditionnent l'architecture des technologies et leur applicabilité dans les domaines où l'on souhaite les implanter : les technologies *Outside-In* (littéralement Extérieur-Intérieur) et les technologies *Inside-Out* (littéralement Intérieur-Extérieur). Les premières technologies ne possèdent pas de capteurs embarqués et ont donc besoin de capteurs extérieurs pour suivre l'individu portant le dispositif. Ce dernier doit donc souvent être accompagné de modules de *constellations* de boules réfléchissantes pouvant être capté par le système de captation externe pour trianguler la position du dispositif et ainsi procéder aux opérations de restitution attenantes (fig.22(a)). Les technologies assujetties au type de suivi *Outside-In* sont typiquement les visiocasques de réalité virtuelle qui ont bien souvent une zone définie, par les capteurs externes, dans laquelle peut se déplacer l'individu. L'augmentation de cette zone se fait au prix d'ajout de capteurs pouvant générer un coût non négligeable. Un système de RA de type SAR (*Spatial Augmented Reality*) est aussi confiné à une zone définie, celle de ses capacités de projection, tout comme un système de RA construit à l'aide de caméras, d'un ordinateur et d'un écran déporté : La zone de restitution sera celle imposée par les possibilités de capture des caméras percevant la scène.



Figure 22: (a) Un système de RA *Outside-In* à gauche. On perçoit les constellations de perception du dispositif par les capteurs externes. (b) A droite, un système de RA *Inside-Out*. La méthode de suivi est basée sur des marqueurs. D'après (Mallem and Roussel, 2019).

A l'inverse, les technologies *Inside-Out* (fig.22(b)) possèdent les capteurs nécessaires à la localisation du dispositif dans son environnement. Celui-ci n'est pas assujéti à une zone définie par une batterie de capteurs externes. Les capteurs qu'il lui permettent de se repérer dans l'espace peuvent être divers : une puce GPS, une centrale inertie (IMU), une carte Wi-Fi et/ou Bluetooth. Les visiocasques Hololens possèdent ce type de capteurs ainsi que les systèmes *HandHeld* tels que les smartphones ou encore les tablettes.

Havard (**Havard, 2018**) considère que les quatre principales familles de suivi sont :

1. Le suivi basé sur un marqueur ;
2. Le suivi basé sur des points d'intérêts ;
3. Le suivi basé sur un modèle 3D ;
4. Le suivi basé sur le SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*).

II.2.1.1 Suivi basé marqueur

Le marqueur est un objet facilement repérable dans la scène par la fonction Captation, et qui, par le truchement des algorithmes de suivi, permet de générer des augmentations visuelles. Ces formes ont des caractéristiques particulières (**Mousa et al., 2015**) :

- Noir et blanc car cela crée un contraste de luminance très élevé (**Siltanen, 2012**) ;
- De forme carrée car il est plus simple d'obtenir les quatre points nécessaires au calcul de la pose de la caméra (**Hartley and Zisserman, 2004**) ;
- Posséder une épaisse bordure noire (**Havard and Baudry, 2019**) ;
- Avoir un identifiant unique à l'intérieur de la bordure (**Havard and Baudry, 2019**).

Quelques exemples de marqueurs (**Mousa et al., 2015**) portés en figure 23 illustrent ces caractéristiques. Cette définition d'un marqueur peut être enrichie du fait que l'on peut utiliser les spécificités des QR-Codes pour générer de la réalité augmentée basée sur les marqueurs. En effet, un QR-Code, de par sa construction, peut permettre de suivre et recalculer des objets dans une scène (**Cheng et al., 2017**).



Figure 23: Quelques exemples de marqueurs. D'après (**Mousa et al., 2015**) et un QR-Code. Ceux-ci peuvent aussi être considérés comme marqueurs.

Havard (**Havard, 2018**) explique que les méthodes de suivi basée sur les marqueurs permettent d'obtenir une bonne robustesse de celui-ci, même avec un nombre conséquent de marqueurs différents présents dans la scène. De plus, le coût algorithmique n'est pas très important car les opérations de calcul de l'image demeurent relativement simples au regard des capacités de calcul actuelles. En revanche, toujours selon Havard (**Havard, 2018**), il est nécessaire de ne pas cacher une partie du marqueur sinon celui-ci n'est plus reconnu. Il faut de surcroît que les conditions lumineuses ne varient pas trop brutalement auquel cas, le marqueur ne serait plus reconnu.

II.2.1.2 Suivi basé sur des points d'intérêts

Le suivi basé sur des points d'intérêts est utile si l'on ne souhaite pas, ou ne pouvons pas, préparer l'environnement au préalable en installant des marqueurs à divers endroits. Ce suivi se base sur des algorithmes de reconnaissance de points remarquables, tels des amers, présents sur les objets qui composent la scène. Il existe plusieurs algorithmes de reconnaissance des points d'intérêts, nous donnons deux exemples tirés de (**Havard, 2018**).

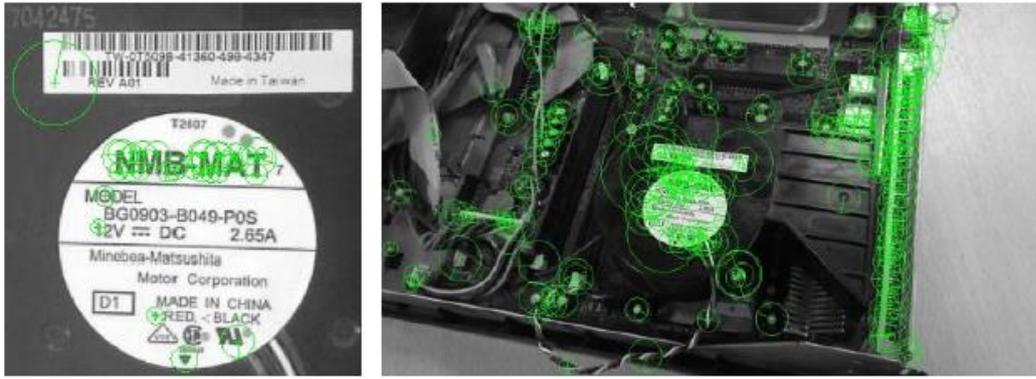


Figure 24: Détection des points d'intérêts grâce à l'algorithme SURF. L'image de référence est à gauche, la scène à droite. D'après (Havard and Baudry, 2019).

Le premier algorithme (SURF) permet de comparer des images de références à des points d'intérêt détectés dans la scène. Nous illustrons le résultat de ce type d'algorithme en figure 24. Deuxième algorithme, basé sur la notion d'échelle permet par opérations de floutage successives, de détecter les points d'intérêts remarquables. Havard (Havard, 2018) présente un exemple de ce type d'algorithme que nous illustrons en figure 25.



Figure 25: Détection des points d'intérêts à l'aide d'opération de floutage successif de la scène. D'après (Havard, 2018).

Havard (Havard, 2018) considère ces méthodes de suivi comme robustes car elles fonctionnent même si les éléments sont partiellement occultés eu égard au fait que chaque élément de la scène peut contenir des dizaines, voire des centaines de points d'intérêt. En revanche, le coût algorithmique est cette fois-ci très important s'il y a beaucoup de points d'intérêt à détecter. De plus, si les objets sont peu texturés, il y aura alors des difficultés pour les algorithmes à réaliser le suivi.

II.2.1.3 Suivi basé modèle 3D

Le suivi basé sur les modèles 3D pourrait être très utile pour les industriels étant donné qu'ils possèdent généralement une modélisation, des produits qu'ils manufacturent, et/ou des moyens qu'ils utilisent (outil, poste de travail, outillage). Les algorithmes de ce type de suivi analysent la scène par le truchement des caméras du dispositif de RA, et peuvent ainsi associer un modèle 3D et ses éléments d'augmentation associés à la scène perçue par le(s) individu(s).

Cette association peut se faire en temps réel (Havard and Baudry, 2019) tel qu'illustré en figure 26, ou bien au début du processus de production lors d'une phase dite de calibration où le modèle 3D du poste de travail est superposé au poste de travail réel (Pusch and Noël, 2019) (fig.27). Les éléments augmentés étant attachés au modèle CAO en amont, ceux-ci se trouvent conséquemment placés lors de la superposition du modèle

3D sur le modèle réel. La précision de cette superposition est cependant subordonnée à la dextérité du placement de ce modèle 3D sur le poste réel, par l'individu en début de production mais aussi à la qualité des techniques de capture et de recalage.



Figure 26: Détection du modèle 3D en temps réel. D'après (Havard and Baudry, 2019).

Ce type de suivi nécessite à la base une fonction Captation de la scène en 3D (de type caméra RGB-D) même si des algorithmes de reconstruction 3D de caméras stéréoscopiques peuvent être utilisés. Il est aussi nécessaire de posséder le modèle 3D de ce que l'on souhaite suivre, ce qui n'est pas toujours le cas, même dans l'industrie. Enfin, pour le suivi basé sur un modèle 3D calibré en début de processus, la précision de localisation des augmentations est fortement corrélée à la dextérité de l'individu lors de la phase de placement du modèle 3D sur le modèle réel.

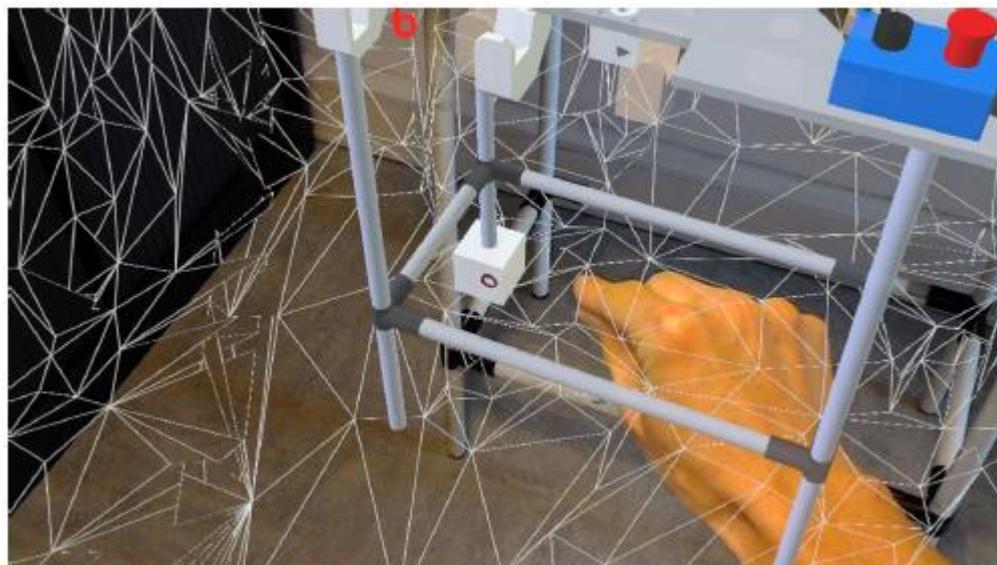


Figure 27: Calibration d'un modèle CAO d'un poste de travail sur son jumeau réel.

II.2.1.4 Suivi basé sur le SLAM

Cette méthode de suivi est basée sur les techniques de vision développées pour la robotique. Ici, l'objectif est de cartographier l'environnement afin de reconstruire celui-ci par un maillage préalable. Le placement de l'augmentation peut ainsi être réalisée sans connaissance préalable de l'environnement dans lequel celle-ci sera insérée. Quelques application grand public utilisent ce principe pour augmenter les scènes comme illustré en figure 28. D'autres méthodes utilisent les outils GPS, les plans des bâtiments comme le FootSLAM (Angermann and Roberston, 2012) ou Wi-Fi tel le WiSLAM (Bruno and Robertson, 2011).

Toutes ces méthodes de suivi possèdent cependant quelques désagréments. Il est nécessaire que l'environnement soit correctement capté par la fonction Captation du dispositif. Or, il est parfois difficile pour les capteurs de l'appareil de RA de percevoir son environnement, celui-ci pouvant être parfois peu texturé, peu lumineux, mouvant, etc. Les augmentations mises en place peuvent ainsi avoir une précision et une stabilité très

faibles (**Blanco-Novoa et al., 2018**). Il est donc parfois nécessaire de prendre en compte les différentes méthodes pour utiliser celle qui aura le plus d'efficacité en regard de la précision demandée. Et cette précision sera plus ou moins importante si on est dans le domaine médical (**Frantz et al., 2018**) ou bien dans un domaine industriel.



Figure 28: Une augmentation visuelle basée sur les techniques de SLAM.

Cheng & alii (**Cheng et al., 2017**) ont par exemple effectués deux expériences dans lesquelles ils comparaient la stabilité et la précision de placement d'appliques murales virtuelles. La première expérience comparait deux méthodes de suivi : basée marqueurs ou basée SLAM (à l'aide des outils GPS du dispositif de RA). Les résultats de cette première étude montrent une forte robustesse de la précision de placement des augmentations à l'aide de marqueurs, mais une subissant une forte influence de la luminosité. En revanche, la stabilité est considérée comme faible, les auteurs mentionnant des éléments virtuels toujours tremblants (« *always shaky* » dans le texte). De l'autre côté, la version GPS souffrait d'une faible précision, les auteurs mettant en cause le dispositif lui-même et ses capteurs associés. La stabilité était considérée comme bonne, le positionnement ne souffrant pas de problèmes de luminosité ou d'occultation.



Figure 29: Comparaison entre un marqueur "complexe" à gauche, et un marqueur « simple » à droite. D'après (**Cheng et al., 2017**).

La seconde expérience fut de faire varier le type de marqueurs : un QR-Code face à un marqueur à la géométrie plus simple : un triangle inscrit dans un cercle lui-même inscrit dans un pentagone (fig.29). L'algorithme de suivi pouvait s'appuyer, dans le cas du QR-Code, sur 1000 points d'intérêts, et dans le cas du marqueur dit simple, sur 50 points d'intérêts. Les auteurs ont montré que la robustesse du placement, stabilité comme précision sont bien supérieures quand l'algorithme a, à sa disposition, plus de points sur lesquels se baser lorsque la scène évolue au gré des déplacements de l'utilisateur.

A propos du cas particulier des dispositifs Hololens, décrit brièvement au travers de l'architecture relative à l'Hololens de 1^{ère} génération en section précédente ([Partie UNE, chapitre II, section 1, II.1.3 Un système de réalité augmentée – Le Microsoft Hololens 1ère génération](#)), une étude a été menée par Rieder & alii ([Rieder et al., 2021](#)) en 2021 afin de mesurer l'évolution de la précision, à courte portée, de l'Hololens 1 par rapport à l'Hololens 2. L'étude consistait pour les participants, à placer le plus précisément possible, à l'aide d'un clavier, l'emplacement des marqueurs holographiques qu'il percevaient dans le dispositif donné, Hololens 1 ou Hololens 2. Il y avait deux couleurs de marqueurs : bleus, et rouges. Les variations étaient mesurées dans le plan et non dans la profondeur. Ces variations pouvaient être de deux sortes : une variation de la détermination du point identifié autour de l'endroit où se trouvait effectivement le point noté SCP (*Spray radius around the Center-Point*), deux composantes cartésiennes CPD_x et CPD_y (*Center-Point Deviation*) et une composante résultante des deux composantes cartésiennes nommée CPD_{mag} (*Center-Point Deviation Magnitude*). Les mesures de variations possibles autour du point idéal sont illustrées en figure 30.

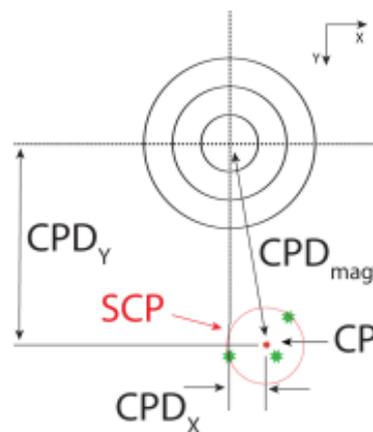


Figure 30: La mesure des variations des points placés par les participants par rapport au point idéal (CP). D'après ([Rieder et al., 2021](#)).

L'étude laisse apparaître qu'en moyenne, l'Hololens 2 était 45,41% plus précis que l'Hololens 1 (val.moy. : 1,790mm contre 0,977mm) en ce qui concerne le placement des points autour du point idéal CP (SCP), et 57,09% plus précis (val.moy. : 2,597mm contre 1,114mm) pour le placement des points en coordonnées cartésiennes (CPD_x et CPD_y).

II.2.2 Fonction Interface

La fonction Interface sera détaillée plus explicitement dans le chapitre suivant. Dans ce paragraphe, nous détaillerons une expérience effectuée par Franco & Cabral ([Franco and Cabral, 2019](#)) et qui avait pour but de mesurer les performances de sélection au sein d'une interface Homme-Machine en utilisant des méthodes d'interaction diverses : par le truchement de boutons virtuels (condition A), par une pression sur un bouton à demeure sur le visiocasque (condition B), ou via une télécommande dédiée (condition C). L'expérience consistait à utiliser un visiocasque, le EPSON Moverio BT-300, et à interagir avec les différentes métaphores d'interaction au sein de l'interface. Il était mesuré plusieurs critères : le temps et le nombre d'occurrences avant de réussir à interagir avec l'élément virtuel, le confort perçu à l'interaction avec l'élément par le participant, enfin, l'acceptabilité de cette interaction selon le participant. Les résultats montrent des performances supérieures provenant de la condition C (avec télécommande) par rapport aux conditions B et A (val.moy. : resp. 24,33s contre 24,98s contre 58,26s). Idem

concernant les échecs à l'interaction : la condition C est plus efficace que la condition B, elle-même plus efficace que la condition A (val.moy. : resp. 0 échec contre 2 échecs contre 4 échecs).

Le confort à l'utilisation des métaphores d'interaction est cependant perçu de la même façon par les participants avec une valeur moyenne de 9/10 pour les conditions B et C et de 8/10 pour la condition A.

Enfin, l'acceptabilité du type d'interaction fut mesurée à travers une question sur le confort d'utilisation en public en donnant une note sur 10. Ici, la condition C est supérieure aux deux autres avec une note moyenne de 10/10, puis vint la condition B avec une note moyenne de 9/10, enfin la condition A, plus clivante, avec une note moyenne de 5,5/10.

Les résultats, plutôt attendus, laissent tout de même entrevoir une appétence pour les nouvelles méthodes d'interaction entre Homme et Machine, car si les performances ne sont pas au rendez-vous, les réponses à la question sur le confort d'utilisation laissent penser que les gens pourraient avoir malgré tout un attrait pour ce type d'interaction. Franco & Cabral (**Franco and Cabral, 2019**) ajoutent d'ailleurs que les participants ont trouvé la gestuelle de pression d'un bouton sur une télécommande plus naturelle, un peu à la manière dont ils utilisent leur smartphone. Peut-être sont-ce les habitudes qui conditionnent ces résultats, tant en termes de performances, qu'en termes d'acceptation. En tous les cas, cette étude montre qu'on ne peut se cantonner à une vision purement axée sur la performance des interactions car cette dernière n'est pas significative dans le degré d'acceptation, par l'utilisateur, des interactions.

II.2.3 Fonction Restitution

Dans un système de RA, la fonction restitution telle que nous la concevons sert à augmenter un ou plusieurs des sens de l'utilisateur à l'usage du système. Cette synesthésie génère, au fur et à mesure que l'on combine plusieurs sens de l'Humain, un sentiment d'immersion plus important. Cette restitution sensorielle de notre CPS peut ainsi avoir plusieurs modalités :

- Une restitution kinesthésique via un bras haptique ou un gant dédié (*smart glove*) (fig.31). Ce dispositif pourrait ainsi fournir une information contextuelle augmentée ou une information contextuelle transformée en indice haptique, ce que Bayard & Kheddar (**Bayart and Kheddar, 2006**) nomment l'amélioration haptique ; ou bien encore amplifier une modalité haptique existante fournie à l'individu, ce que les auteurs (**Bayart and Kheddar, 2006**) nomment l'haptique augmentée.



Figure 31: Le prototype du futur gant haptique de chez Meta. [Crédits photo : Facebook Reality Labs.](#)

- Un retour auditif prodigué autour d'un son spatialisé ou à intensité variable. Celui-ci doit cependant être prodigué par un nombre de 27 sources spatiales de retransmission sonore comme l'atteste l'étude de Rajguru et alii ([Rajguru et al., 2020](#)). Si ce nombre de sources n'était pas atteint, alors il résulterait une élévation d'erreur d'estimation de la provenance des stimuli sonores d'un facteur 5.
- Un rendu olfacto-gustatif. Ce type de restitution est doublement complexe. Tout d'abord, du point de vue de l'Humain, les récepteurs sensoriels associés à ces sens sont chimiques et donc difficiles à simuler. Ensuite, les quelques expériences qui ont été menés ([Iwata et al., 2004](#); [Yanagida et al., 2004](#)) (fig.32) montrent que les dispositifs de stimulation de ces sens sont lourds à déployer. Il en résulte souvent un sentiment d'immersion peu convaincant car les moyens mis en œuvre ne trompent pas les sens des individus, et en tous les cas, ce ne sont pas ces sens qui sont prioritairement utilisés dans l'industrie. ([Iwata et al., 2004](#)) expliquent que les tringleries du système de mastication et d'éjection du jet gustatif génère une sensation de mastication qui rend celle-ci non-naturelle.

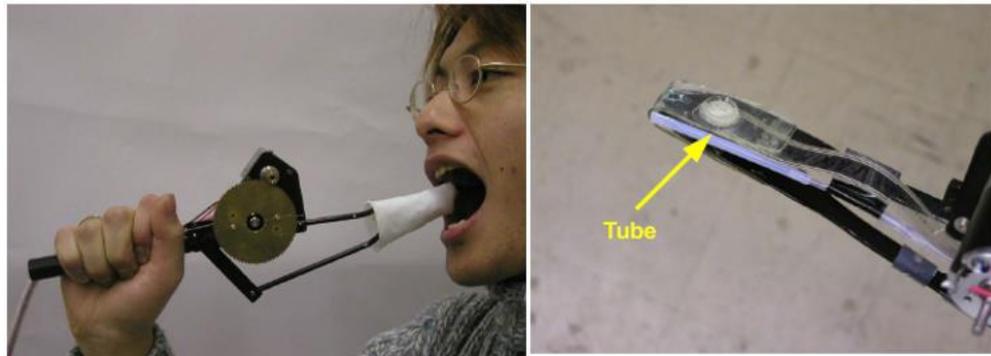


Figure 32: (a) Le système haptique de mâchoire à gauche, (b) le dispositif d'éjection du jet gustatif à droite. D'après ([Iwata et al., 2004](#)).

- Une restitution visuelle à travers une interface graphique. Ce sens est le plus couramment stimulé au sein des systèmes de RA et c'est celui que nous avons choisi de développer plus en détail dans le paragraphe qui suit.

La fonction de restitution visuelle peut être obtenue de différentes manières en réalité augmentée. Cette restitution est fonction du rendu visuel que fournit l'architecture du dispositif. Dans la figure 33, Havard ([Havard, 2018](#); [Havard and Baudry, 2019](#)) fournit un exemple de réalité augmentée obtenue à l'aide de dispositifs de RA différents.

Le cas idéal illustré en fig.33(f), serait obtenu différemment selon que l'architecture de restitution de l'appareil de RA. Ainsi, dans le cas d'un visiocasque type OST (Optical See-Through), la flèche verte que l'on souhaite afficher se rapprocherait du cas idéal (fig.33(a)) moyennant quelques écarts avec le cas idéal, notamment dans la résolution, et la luminosité de la flèche. Le *champ de vision*, ou FoV (*Field of View*) du dispositif viendrait aussi grever les qualités d'affichage de la flèche, car celle-ci disparaîtrait si l'utilisateur venait à franchir la diagonale permise par le champ de vision de l'appareil. Ces FoV sont relativement faibles à l'heure actuelle allant de 23° à 90°. Les technologies de type OST sont les visiocasques MICROSOFT HoloLens 1 et 2, le MAGIC LEAP One, ou encore le DAQRI Smart Glasses. Cette liste est non-exhaustive.

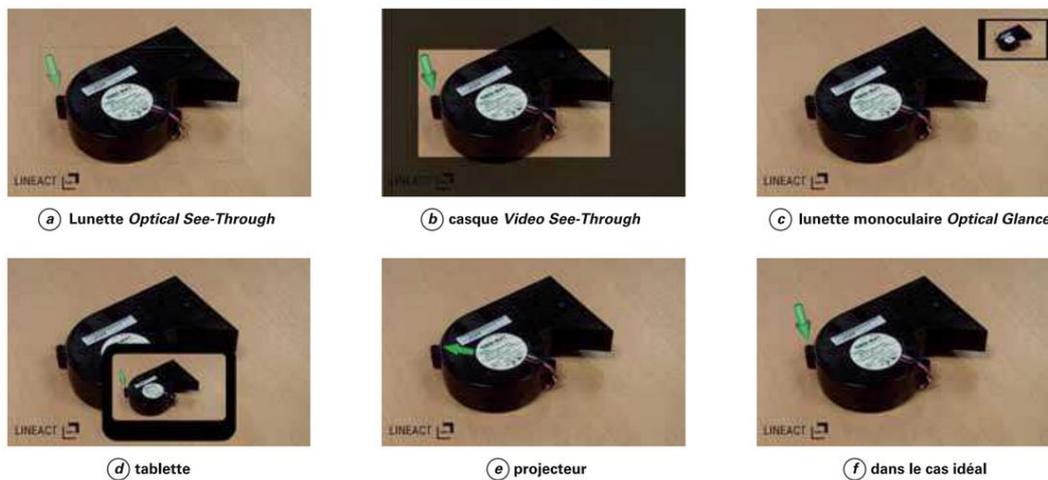


Figure 33: Différents types de rendu visuel en fonction de l'architecture de restitution du dispositif de RA. D'après (Havard, 2018; Havard and Baudry, 2019).

Deuxième moyen de restitution visuelle d'un élément virtuel par visiocasque de type VST (Video See-Through). La restitution visuelle est sensiblement identique au cas idéal fig.33(f) mais aussi au cas OST fig.33(a). La différence de ce type de visiocasque réside dans le fait que l'individu est aveugle dans le cadre de l'utilisation de visiocasque VST car l'appareil obstrue le champ de vision de l'individu et capte à sa place l'image de l'environnement à l'aide des caméras prévues sur le devant du dispositif. Ce type de casque est adapté pour faire de la réalité mixte car l'on peut passer de la RA à la RV (réalité virtuelle) avec ce type de technologie. La restitution graphique dans un casque de type VST (fig.33(b)) peut être altérée dans son ensemble. Ainsi, ce ne sera plus la flèche qui souffrira d'un écart de résolution et de luminosité par rapport au cas idéal mais l'ensemble de l'image étant donné que celle-ci est entièrement synthétisée par l'appareil. Autre point important à noter, la latence. Celle-ci peut devenir une véritable contrainte si l'algorithme doit à tout instant calculer les positions relatives aux mouvements des individus et des éléments et en même temps devoir retranscrire fidèlement l'environnement. Havard a représenté le cas VST avec un cadre noir autour pour symboliser la limite du FoV qui, sur ces appareils-ci, est aussi à prendre en compte dans le choix de ce mode de restitution. Les dispositifs pouvant répondre à ce type d'appareil sont ceux présentés en figure 12(a) et (b). Cette liste est ici encore non-exhaustive.

La figure 33(c) montre comment serait perçue la flèche verte à l'usage d'un dispositif de RA de type VST monoculaire. En général, ceux-ci sont des dispositifs légers tels l'OPTINVENT Ora-2 ou le VUZIX M100 qui possèdent une architecture ressemblant à une paire de lunettes. L'augmentation fournie dans ce type d'appareil est un petit écran déporté, au niveau de l'œil droit de l'individu. L'augmentation du champ visuel n'est donc effectuée dans l'intégralité du FoV de la machine mais dans un petit coin car l'appareil ne recale pas le ou les élément(s) virtuel(s) par superposition au champ de vision de l'Humain, comme le ferait un dispositif de type OST tel l'Hololens, il le mixe dans l'image que les caméras du dispositif ont préalablement capturée. Ainsi, ce type de dispositif de RA est considéré comme un sous-genre du type VST. Les problèmes résultants sont donc les mêmes que pour les appareils VST avec en plus, la particularité d'avoir une image déportée, souvent très petite, et en 2D.

Autre architecture de restitution, celle par tablette/mobile (fig.33(d)). Le dispositif capture la scène via ses caméras embarquées et l'algorithme mixe l'image capturée avec les éléments virtuels qu'il faut ajouter. Ce type de dispositif est plutôt mature et les usagers ont l'habitude de se servir de ce type d'appareil. Notre flèche aura donc un rendu visuel plutôt correct. De plus, si le dispositif capture toute la scène, l'individu peut tout de même voir celle-ci, il n'est pas « aveugle » comme il pourrait l'être avec un appareil de type VST. Cependant, étant donné que l'augmentation est synthétisée avec

l'environnement complet, il peut résulter des problèmes de latence si l'environnement est complexe et si un nombre conséquent d'éléments virtuels viennent enrichir celui-ci. De plus, étant donné la nature du dispositif, un appareil porté par l'Homme, il peut découler des problématiques de parallaxe qui aurait pour effet de casser l'immersion et dans le cadre de tâches industrielles, potentiellement grever la précision de celles-ci. Enfin, ces dispositifs sont manipulés par les individus qui n'ont plus les mains libres ce qui peut être disqualifiant dans le cadre de travaux industriels nécessitant l'emploi de ses deux mains.

Dernière architecture de restitution, le projecteur (fig.33(e)). Ces technologies sont très matures et déjà très utilisées, notamment dans l'industrie aéronautique. Ces appareils projettent une image ou un profil fournissant ainsi une indication visuelle. Ces dispositifs souffrent néanmoins de limites. La première est que l'élément virtuel doit être apposé sur un support. Il n'est en effet pas possible de faire flotter des éléments virtuels dans l'air à la manière des autres technologies. Deuxième point limitant, il n'est pas possible de projeter des augmentations de formes complexes. Il s'agit bien souvent de projeter des profils. Enfin, les interactions avec l'Humain sont limitées et permises via un ordinateur. Si les interactions résultantes sont robustes du point de vue du confort d'utilisation, celles-ci restent sommaires. Les qualités de ce type de technologies sont, 1/un FoV semblable à celui de l'œil Humain car celles-ci agissent par projection des augmentations dans la scène, 2/une autonomie illimitée car les dispositifs sont branchés ne sont pas assujettis à des batteries externes, enfin, 3/du point de vue de l'individu, celui-ci n'est pas assujetti à porter un dispositif, il a donc les mains libres et ne subit pas l'intrusion d'un visiocasque sur le crâne.

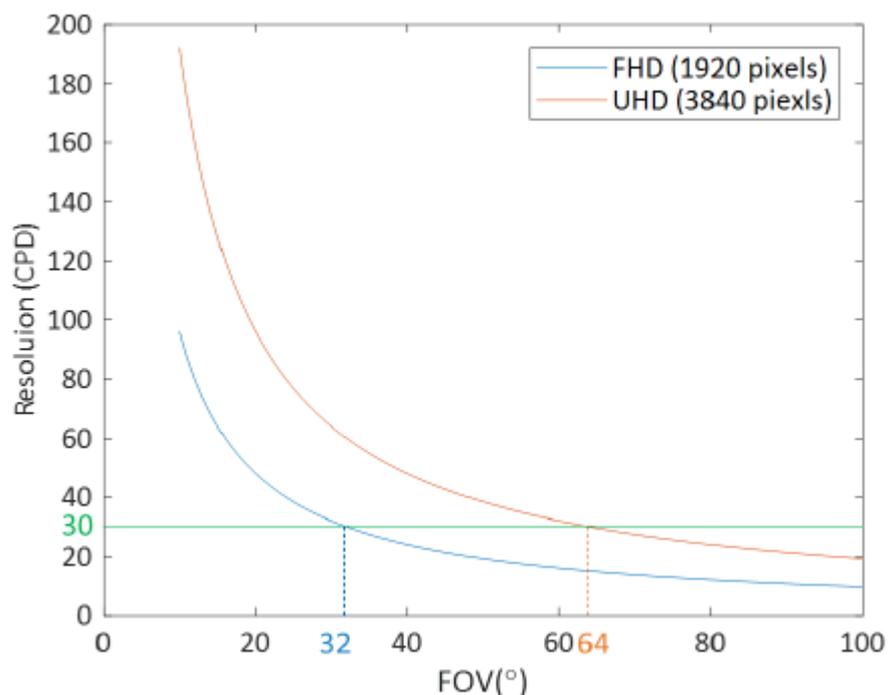


Figure 34: Les FoV résultant d'une résolution de 30 CPD (Cycle par Degré) pour une image composée de 1920 pixels (FHD) ou de 3840 pixels (UHD). D'après (Lee et al., 2020).

Quelques limites technologiques, liées aux techniques de rendu et de visualisation ont déjà été énoncées. Nous allons dorénavant plonger plus en profondeur dans les détails inhérents à certaines limites remarquables que les dispositifs et les technologies associées devront surmonter pour gagner en efficacité et en ergonomie d'usage. Parmi ces limites, nous pouvons nommer la résolution, elle-même étroitement liée à une autre limite que possède les technologies avec architecture de restitution visuelle, le champ de vision (ou FoV en anglais pour Field of View). En effet, l'immersion dans un environnement composé d'éléments virtuels est liée à l'imbrication de ceux-ci au sein du

monde réel perçu par l'individu au travers de la technologie. Ces éléments doivent posséder une bonne résolution afin de ne pas casser ce sentiment d'immersion (Lee et al., 2020). Pour ce faire, une lentille (ou un jeu de lentilles) est utilisée afin de permettre l'agrandissement du champ de vision de l'individu au sein de la technologie. Cependant, selon Lee & alii (Lee et al., 2020), plus l'image est grande, plus les pixels composant cette image sont importants. Il en résulte une aggravation de la résolution de l'image qui ne peut être compensée que par un compromis entre la résolution des éléments virtuels et le FoV (ou champ de vision) désiré. Les auteurs montrent que l'augmentation du nombre de pixels augmente automatiquement le champ de vision à iso-résolution (fig.34). Ainsi, il se dégage l'idée que l'augmentation toujours plus importante du nombre de pixels dans une image peut augmenter mécaniquement le FoV.

Nota Bene: Un CPD (Cycle par Degré) de 30 équivaut à une acuité visuelle de 10/10 en ophtalmologie. Plus de détail sur l'acuité visuelle humaine et l'échelle de mesure CPD sur le site du Dr. Damien Gatinel⁶, ophtalmologue, chirurgien spécialiste de l'œil et titulaire d'un doctorat de mathématiques appliquées aux propriétés optiques et topographiques de la cornée.

Le nombre de pixels n'est qu'une considération qualitative à propos de l'image projetée. La qualité de la dalle et les techniques de fabrication ont un impact sur le rendu final opéré par celle-ci à l'utilisateur. Jang & alii (Jang et al., 2020) ont effectué un état des lieux des avancées sur les dalles OLEDs (diodes électroluminescentes organiques) et QLEDs (diodes électroluminescentes à points quantiques) en 2019. Selon les auteurs, les premières souffrent toujours d'une durée de vie médiocres au niveau des émetteurs de la couleur bleue (ddv : 1200hrs pour les OLEDs solubles, 20000hrs pour les OLEDs phosphorescentes, et 100hrs pour les OLEDs fluorescentes). Du côté des dalles QLEDs, ce sont les performances des émetteurs verts et bleus qui sont à améliorer pour obtenir des images acceptables. Les dalles QLEDs étant majoritairement composées de Cadmium, des innovations sont testées afin de supprimer cet élément chimique toxique et polluant. Des dalles à base d'Indium ont été fabriquées bien que celles-ci souffrent de performances moindres que sa concurrente au cadmium.

La technologie OLED remplacera à terme la technologie LCD car cette dernière nécessite un rétroéclairage par LEDs, très gourmand en énergie, alors que la technologie OLED permet de s'affranchir de ces LEDs, les pixels s'alimentant eux-mêmes en énergie d'où le terme d'affichage « auto-émissif » concernant la technologie OLED. Cependant, la technologie LCD est majoritaire aujourd'hui sur le marché pour son faible coût de fabrication. Par ailleurs, une majorité de dispositifs de RA utilisent la technologie LCD pour l'affichage augmenté de l'environnement de l'individu. Une étude faite en 2018 par Han & Suk (Han and Suk, 2019) expose les différences perçues par des utilisateurs à l'utilisation de dispositifs ayant trois types de dalles : des écrans LCD, des dalles OLEDs à 100% et des dalles OLEDs à 70%. Deux architectures de restitution étaient utilisées : une architecture type smartphone, une autre type visiocasque. 22 participants ont observé des images et devaient répondre à deux questionnaires : le premier portant sur trois termes : réalisme, luminosité, esthétique. Un second questionnaire où les participants devaient donner deux adjectifs pour décrire les images perçues dans le dispositif. Les résultats exposés en figure 35 montre une prédominance des dalles OLEDs sur celles LCD et ce, quel que soit l'architecture du dispositif. De surcroît, sur les dalles LCD, si l'on compare les deux dispositifs, on s'aperçoit de la nette domination de la qualité de l'affichage du smartphone (brillant, confortable, doux) sur celui du visiocasque (flou, terne), peut-être dû au fait que les techniques de rendu étant plus complexes à mettre en œuvre dans le système optique des visiocasques.

⁶ <https://www.gatinel.com/recherche-formation/acuite-visuelle-definition/acuite-visuelle-resolution-et-pouvoir-separateur-de-loeil/>

Panel	OLED 100%		OLED 70%		LCD 100%	
	HMD	Smartphone	HMD	Smartphone	HMD	Smartphone
Context						
Extracted characteristics	Bright	Bright	Neat	Dark	Blurry	Bright
	Clear	Brilliant	Soft	Comfortable	Dull	Comfortable
	Brilliant	Clear	Clear	Neat	Comfortable	Soft

Figure 35: Adjectifs les plus couramment donnés selon le type de dalle utilisée et le dispositif de RA. D'après (Han and Suk, 2019).

Concernant les critères de luminosité, et d'esthétisme des images perçues, les dalles OLEDs sont systématiquement supérieures aux dalles LCD à l'utilisation des deux dispositifs. Dans le cas du réalisme, les résultats de l'étude montrent une préférence pour les dalles LCD bien que les chiffres soient non significatifs au test de Wilcoxon ($p_{\text{smartphone}}=0,35$; $p_{\text{visiocasque}}=0,54$).

Finalement, les auteurs concluent sur les limites des dalles LCD pour l'utilisation des visiocasques et invitent les fabricants de ces derniers à préférer une architecture de restitution visuelle à dalle OLED pour maximiser la satisfaction des utilisateurs.

Autre limite à considérer et liée elle aussi au FoV : la *Eyebox* (fig.36). Celle-ci est corrélée au champ de vision en ceci que l'augmentation de la largeur de la première diminue la largeur du second (Lee et al., 2020). Des recherches récentes ont permis de compenser en partie cette difficulté en proposant des systèmes mécaniques ou optiques de suivi oculaire afin d'agrandir partiellement la *eyebox*. Par exemple, le suivi oculaire par procédé optique utilise un Élément Optique Holographique (HOE pour *Holographic Optical Element* en anglais) pour modifier l'image en fonction de l'endroit où est porté le regard. Ce dispositif permet de posséder toute la largeur possible du champ de vision possible et d'augmenter partiellement la *eyebox* en fonction de l'endroit où regarde l'individu.

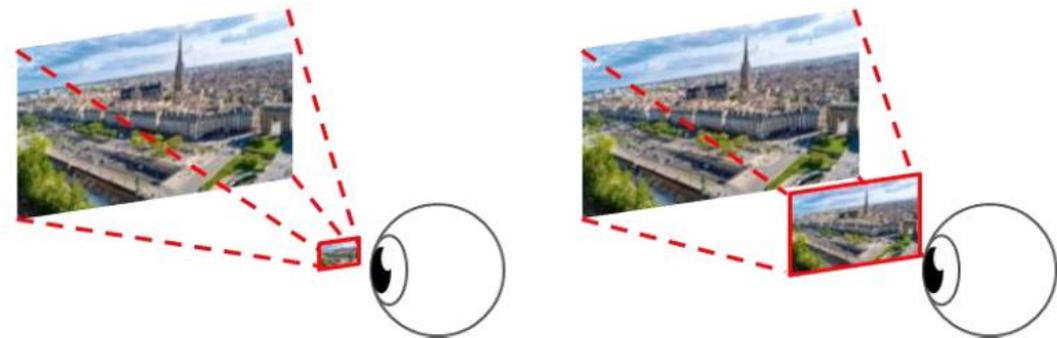


Figure 36: La *eyebox* est le plan focal par lequel l'individu perçoit l'environnement augmenté au sein de la technologie de RA. La taille de cette *eyebox* influe donc énormément sur la capacité que possède l'utilisateur à percevoir les détails dont est composé cet environnement. D'après (Lee et al., 2020).

Si la taille de la *eyebox* est importante pour saisir tous les détails d'une image augmentée, sa distance de positionnement par rapport aux yeux de l'individu l'est tout autant car elle est à l'origine de potentiels problèmes d'accommodation et de vergence. En effet, dans le monde réel, l'humain perçoit les images par l'intermédiaire d'un système stéréoscopique : ses deux yeux séparés d'une distance d_{yeux} . Le Dr Damien Gatinel définit l'acuité visuelle stéréoscopique : « la perception du relief est liée à la différence de projection rétinienne entre les images perçues par les deux yeux quand ils fixent un même objet, en raison de l'effet de parallaxe ». Une contraction du cristallin des yeux permet ainsi à l'image perçue par l'œil de converger vers la rétine. Les problèmes pouvant résulter d'une

mauvaise contraction de l'œil sont alors compensées par l'ajout de lentilles externes (des lunettes). Ces dernières ont pour objectif de faire converger les rayons lumineux au centre de l'œil à la place du cristallin défectueux. Il faudra par ailleurs adapter la déviation des rayons lumineux à l'incapacité du cristallin à se contracter lors de la percussion des rayons lumineux sur celui-ci. Cette adaptation à la déviation des rayons est appelée *vergence* en optique.

Dans le cadre de la RA, les techniques de restitution influent sur ce phénomène de vergence et peuvent être alors la source d'images floues. Les technologies doivent être construites pour que l'écart entre les rétines de l'Humain et les lentilles de la machine, par lesquelles l'individu verra l'environnement, permettent l'affichage d'une image qui ne soit pas dégradée.

La machine qui a pour objectif de retranscrire sur la eyebox une image en 3D nécessite ainsi l'utilisation d'au moins deux caméras RVB. Celles-ci agiront tels des yeux pour la machine. Deux images planes seront capturées par les caméras et un algorithme se chargera de la mise en relief de la scène tout en y ajoutant les éléments virtuels à la profondeur requise. Souvent, les technologies dissocient l'image capturée par les caméras RVB et un (ou des) capteur(s) infra-rouge permettant de générer une carte de profondeur. Une problématique supplémentaire de *parallaxe* entre la scène perçue par les caméras du dispositif et celle perçue par l'individu s'ajoute à la problématique de vergence. En effet, la distance entre les caméras du dispositif, $d_{\text{caméras}}$, n'est pas nécessairement identique à la distance d_{yeux} de l'individu. De plus, les caméras peuvent être à une distance différente de l'objet. La focale sera donc différente et peut engendrer des images floues et rendre inacceptable l'utilisation du dispositif par l'individu.

L'accumulation de ces deux disparités de perception entre la machine et l'Humain peuvent donner lieu à des problèmes de perception de la profondeur, lors du placement de l'objet virtuel dans l'environnement réel dans le cas d'un système de restitution Optical See-Through, lors de la visualisation de la scène reconstituée sur la eyebox dans le cas de systèmes de restitution Video See-Through et sur l'écran pour les smartphones et les tablettes. Mallem & Roussel (**Mallem and Roussel, 2019**) expliquent par ailleurs que « l'erreur d'estimation de la distance (sous-estimation de la distance réelle) augmente exponentiellement par rapport à la distance réelle perçue ». Les dispositifs devront posséder les moyens techniques de compenser en temps réel les problématiques de parallaxe en ajustant la focale afin de ne pas, là encore, rendre l'image floue ou dégradée.

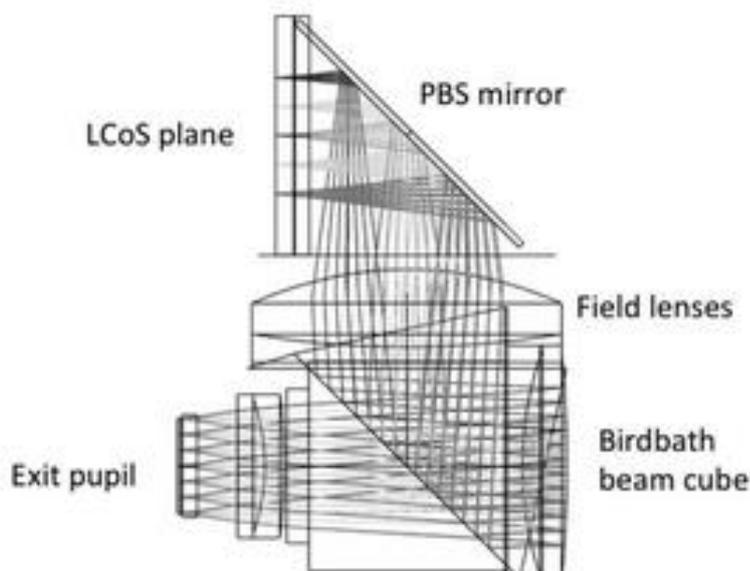


Figure 37: Collimateur à bain d'oiseau de l'HoloLens 1. D'après (Kress and Cummings, 2017).

La construction des lentilles optiques a aussi fait l'objet d'innovation. Auparavant les dispositifs étaient armés d'optiques utilisant la technique dite du bain d'oiseau. La lumière suivait donc un cheminement permettant de la *collimater* partiellement ou totalement puis était projetée directement sur l'œil (fig.37). Dans d'autres cas, sur les visiocasques Hololens 1 et Hololens 2 notamment, la lumière, après passage dans le *collimateur* par bain d'oiseau est transférée à une structure supplémentaire dite guide d'ondes.

Cette structure permet de décomposer l'image en couleurs élémentaires et par le truchement de divers procédés et techniques optiques, de réduire la masse des composants présents devant les yeux de l'individu. En revanche, ces techniques ont le désavantage de dégrader les couleurs de l'image par un effet d'aberration chromatique appelé « effet arc-en-ciel » quand l'angle de diffraction devient élevé (fig.38).

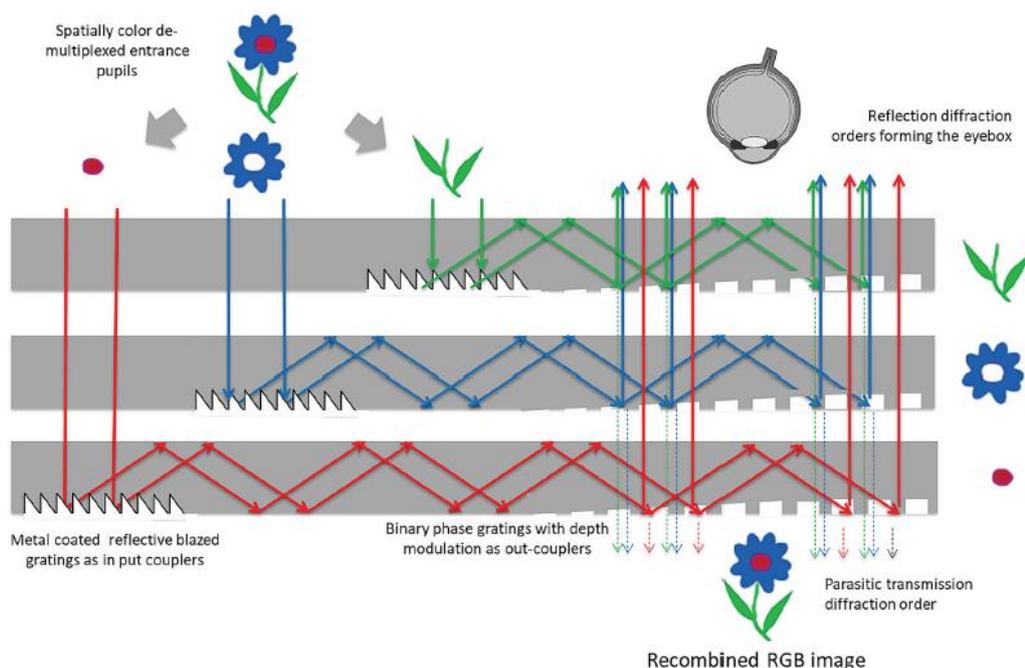


Figure 38: La technique de combinaison des ondes par décomposition des couleurs de la scène perçue. Un effet arc-en-ciel résulte quand l'angle de diffraction est élevé. D'après (Kress and Cummings, 2017).

Hormis les techniques de rendu visuel utilisées, le type d'architecture de restitution visuelle a un impact sur les performances et le confort d'utilisation du dispositif si l'on considère les caractéristiques de la tâche à effectuer. Par exemple, en 2016, Büttner & alii (Büttner et al., 2016) ont effectué une comparaison d'une technologie par projection (une caméra qui scrute la scène couplée à un ordinateur qui analyse et recalcule l'image puis restitue l'information augmentée via un écran déporté) et d'un visiocasque lors d'un essai d'assemblage auprès de 13 participants. Ils ont conclu que le système par projection génère une performance supérieure au système HMD, tant du point de vue de la qualité des tâches effectuées (val.moy. : 0,25 erreur contre 2,5 erreurs), que du point de vue de la productivité (val.moy. : 8,2s contre 21,09s). En 2021, Alves & alii (Alves et al., 2022) ont effectué la comparaison sur des opérations d'assemblage à partir de trois architectures de rendu visuel différentes : une architecture HMD, une seconde HMD, une dernière utilisant la projection. Les résultats ont été mesurés du point de vue de la performance (temps de complétion de la tâche, nombre d'erreurs), et du point de vue de la demande physique et mentale que le système impose à son utilisateur. Les performances montrent un net avantage en termes de temps de complétion de la tâche pour les technologies HMD et par projection par rapport à la technologie mobile (val.moy.resp. : 139,9s contre 134,8s contre 194,5s). En revanche, du point de vue des erreurs commises, la technologie de projection est toujours supérieure à la technologie HMD comme HMD (val.moy.resp. : 8

erreurs contre 22 erreurs contre 24 erreurs). La demande physique, illustrée en figure 39, est plus importante pour les technologies avec une fonction interface évoluée (HMD et HHD) que pour la technologie de projection.

Les efforts cognitifs montrent une corrélation forte, pour toutes les technologies, de la demande mentale par rapport à l'effort. Pour les technologies HMD et par projection, les auteurs notent une corrélation entre le niveau de demande physique et la frustration. Finalement, à la question posée auprès des 30 participants sur leur technologie préférée, ceux-ci ont répondu pour 14 d'entre eux pour l'architecture par projection, 13 pour la technologie HMD et le restant, soit 3 pour la technologie HHD.

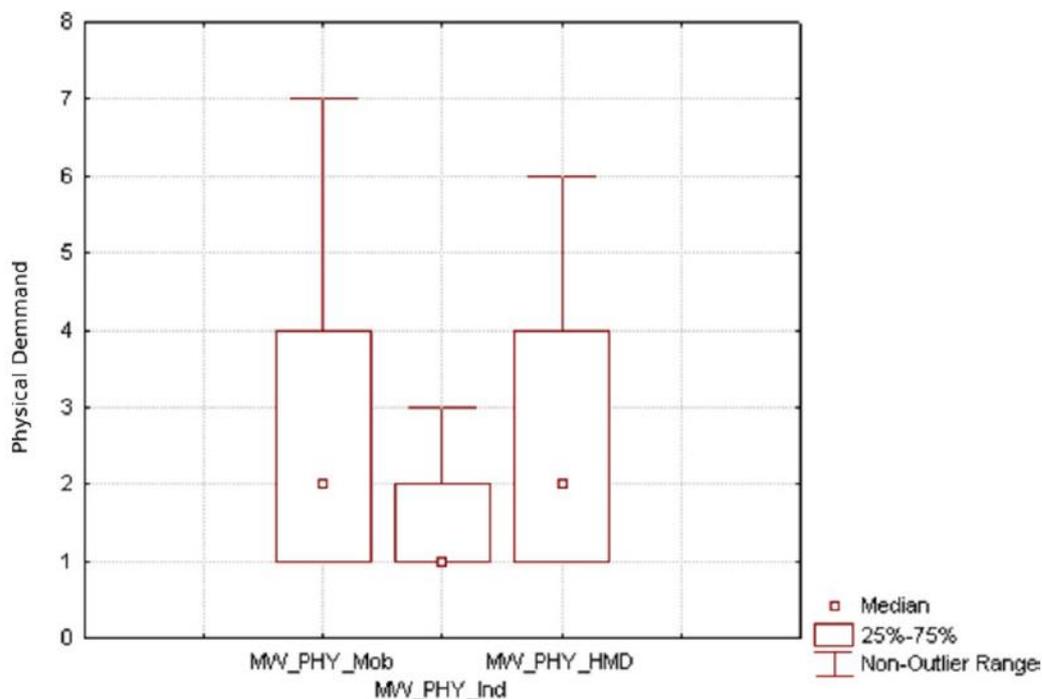


Figure 39: L'effort physique demandé aux participants par architecture de restitution visuelle. Les technologies avec une fonction Interface importante nécessite un effort plus important que les technologies ayant une interaction Homme-Machine faible voire inexistante. D'après (Alves et al., 2022).

Les résultats de l'expérience faite par (Alves et al., 2022) montrent ainsi une forte corrélation entre l'acceptation de la technologie et la complexité de l'interface de restitution visuelle et des interactions possibles entre l'Humain et la machine. Cette complexité dans les interactions peut ainsi générer des charges mentales qui sont souvent vectrices de rejet de la technologie de RA (Funk et al., 2017). Il faut donc prospecter auprès du champ des interactions Homme-Machine et de ses éléments constitutifs pour dégager un moyen de construire des méthodes industrielles d'aides aux tâches sans pour autant générer de frustration inhérente à l'utilisation d'un dispositif présentant un nombre d'interactions important. Cela passe donc par l'information que l'on fournit à l'utilisateur, mais aussi par sa constitution (sa géométrie, son comportement). Cette constitution, nous la nommons *métaphore d'interaction* et nous présenterons celle-ci dans le chapitre suivant.

Chapitre III : De l'interaction entre l'Homme et la Machine : Les interfaces utilisateur

Section 1 Modalités d'Interaction Humain-Machine

La norme ISO 9241-210 (**International Organization for Standardization, 2010**) édictée par l'organisme de normalisation international ISO définit une interface utilisateur comme : « *all components of an interactive system (software or hardware) that provide information and controls for the user to accomplish specific tasks with the interactive system* ». Le système interactif est caractérisé par ses fonctionnalités matérielles (vitesse de calcul de l'unité centrale, moyens physiques d'interaction avec la machine, etc.) autant que par ses caractéristiques logicielles (contenu de l'application, ergonomie de l'interface, etc.).

Norman et Draper (**Norman and Draper, 1986**) fournissent une définition moins technocentrée et plus axée sur la collaboration avec l'Humain. Selon eux, une interface homme-machine est présentée comme un processus de collaboration et de communication entre l'Humain et la machine. Ils explicitent par ailleurs le caractère bilatéral de cette communication et de ce flux d'information. Cette dernière peut être traitée par la machine en provenance de l'Humain, via la manipulation de contrôle contenus dans l'application, comme elle peut être traitée par l'Humain quand la machine lui octroie une information lui permettant de réaliser une tâche.

III.1.1 Quelques modèles d'architecture des interfaces homme-machine

Le flux d'information énoncé par Norman et Draper transite à travers une interface numérique complexe dont l'architecture a fait l'objet d'un nombre important de recherche pour spécifier au mieux la composition de celle-ci. Le modèle historique le plus répandu et le plus cité est sans doute le modèle SEEHEIM (**Pfaff, 1983**) (fig.40).

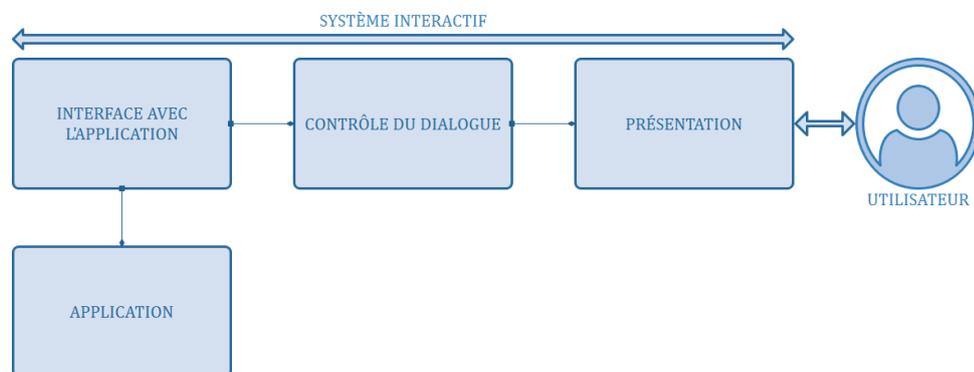


Figure 40: Le modèle d'architecture d'une interface homme-machine. D'après (**Kolski, 1995**).

Ce modèle décompose une application en trois modules logiques :

1. Le module *Présentation (View)* : Il gère l'affichage des informations à l'utilisateur et interprète les actions de celui-ci sur le système interactif.
2. Le module *Contrôleur du dialogue (Controller)* : Il gère le séquençement de la restitution qui sera fourni à l'utilisateur. Dans le cadre d'une restitution visuelle, le contrôleur du dialogue affichera les écrans successifs permettant de réaliser une tâche par exemple.

3. Le module *Interface de l'application (Model)* : Il gère la communication des données entre l'interface de restitution et l'application. Les ingénieurs spécialisés en génie logiciel nomme ce module *Interface du noyau fonctionnel*.

Ce module est considéré par certains (**Coutaz, 1990**) comme abstrait et moins proche des préoccupations des développeurs. Certains chercheurs ont proposé des versions revisitées de ce modèle dont nous ne nous ferons pas l'écho dans ce manuscrit, car les différences conceptuelles mises en exergue par les experts sont relativement éloignées de notre propos.

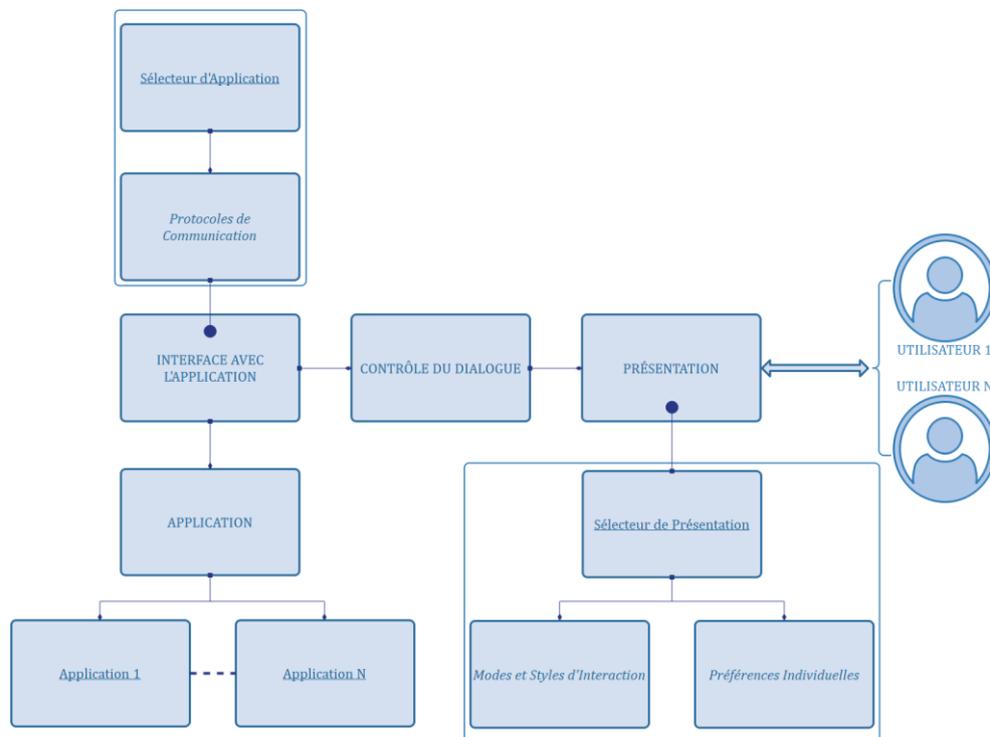


Figure 41: Le modèle de l'interface flexible. D'après (**Kolski, 1995**).

Des recherches portant sur l'incorporation du facteur humain dans les IHMs afin de fournir une application numérique qui soit plus ergonomique ont été effectuées dès la fin des années 80. Celles-ci se basent toutes sur le modèle de SEEHEIM et posent les bases de l'ergonomie moderne d'une application numérique. Ainsi, Williges et alii (**Williges et al., 1987**) ont caractérisé le concept d'interface flexible. Cette interface doit être adaptable au gré des désirs de chaque utilisateur. A partir d'une base de données, l'utilisateur peut ainsi paramétrer les modalités de présentation et les styles d'interaction avec la machine. Kolski (**Kolski, 1995**) décrit trois bases nécessaires à la réalisation d'une interface flexible (fig.41): « la première base contient l'ensemble des protocoles de communication avec les différentes applications constituant l'environnement de travail de l'utilisateur, la deuxième base contient les modes de présentation (couleurs, tailles de fenêtres, etc.) et les différents styles d'interaction accessibles aux utilisateurs de l'interface, la troisième base, spécifique à chaque utilisateur du système global, contient les préférences de chacun d'entre eux dans les modes de présentation et/ou dans les styles d'interaction ».

Kolski précise que ce type d'interface nécessite un coût de développement très important résultant notamment du fait que ce type d'interface pourrait être apposée sur plusieurs applications différentes grâce au sélecteur d'application. Ces applications peuvent par ailleurs s'avérer très hétéroclites les unes par rapport aux autres et donc nécessiter un important travail de compatibilité.

Un autre type d'interface est basé sur un travail de développement empirique où les erreurs humaines effectuées lors de tests permettrait de générer la création d'un débogueur. Cette interface nommée interface tolérante aux erreurs humaines se décompose en 3 modules (fig.42) : un premier module de décodage de l'action par le système, un second module de classification de l'action selon un modèle défini et intégré à l'interface. Enfin, le dernier module renvoi à l'utilisateur les informations nécessaires à la correction de l'action.

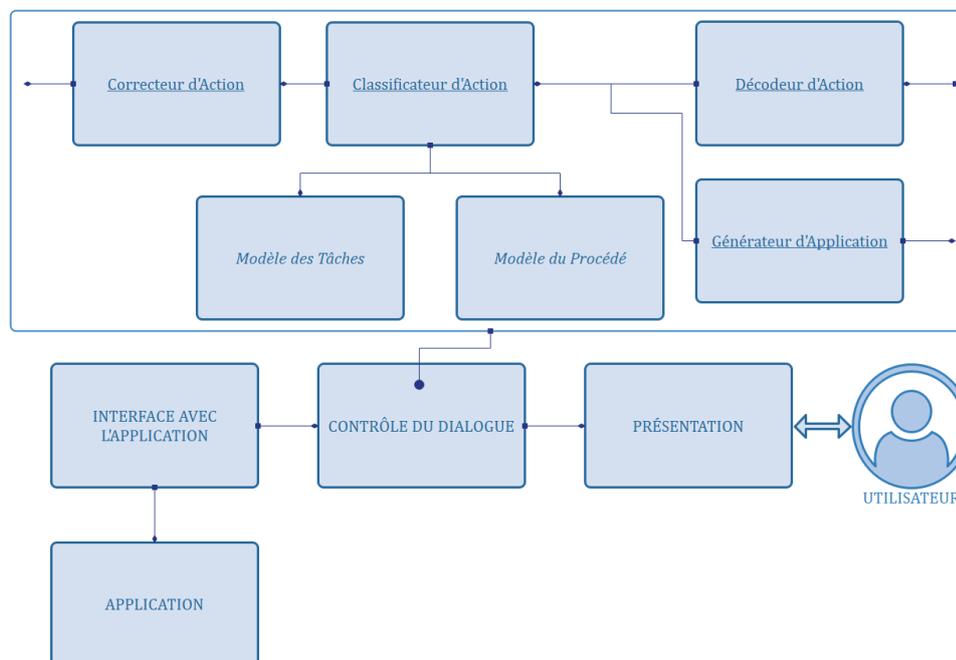


Figure 42: Le modèle de l'interface tolérante aux erreurs humaines. D'après (Kolski, 1995).

Le problème de ce type d'interface est qu'il se base sur un modèle d'actions erronées établies empiriquement mais pas forcément exhaustives (Kolski, 1995). L'interface ne sera donc plus tolérante en cas d'impair inconnu survenu lors de la réalisation d'une tâche par l'individu au sein de ce type d'interface.

Développée en même temps que l'interface tolérante aux erreurs humaines (fin des années 80, début des années 90), la notion d'interface opérant telle un « opérateur assistant » (Boy, 1988) prend en compte les recherches effectuées dans les sciences cognitives pour développer un modèle constitué de modules de contrôles basés sur le processus cognitif humain (fig.43).

Ce type d'interface est capable d'anticiper des erreurs qui aurait une probabilité importante de subvenir et de proposer à l'individu les moyens de pallier à ces potentiels écueils. Pour cela, un module de gestion de la mémoire à long terme déduit une série de règles qui sera établie sur la base de la construction de connaissances situationnelles et de connaissances analytiques. Cette série de règles sera évoquée à l'utilisateur qui pourra ou non suivre les conseils suggérés par l'interface.

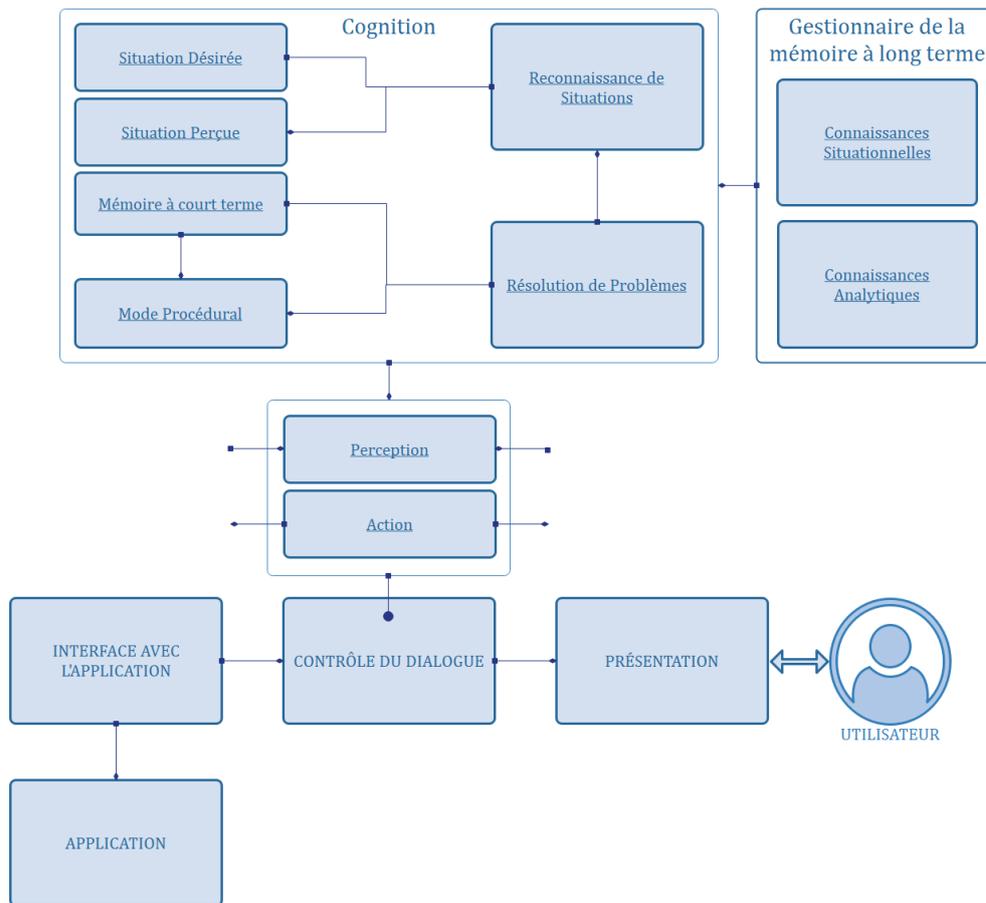


Figure 43: Le modèle de l'interface « opérateur assistant ». D'après (Kolski, 1995).

Au sein de ce paragraphe, nous avons brossé un bref paysage des concepts d'interfaces qui ont émergé au cours du temps. Il est remarquable de constater que l'approche effectuée par les différents concepteurs de ce type d'interface nécessite dorénavant plus que des experts en développement informatique. On le voit, les enjeux liés à l'adaptativité des interfaces interrogent la façon dont celles-ci sont conçues. Il ne faut plus seulement résoudre des problématiques techniques mais aussi prendre en compte le facteur humain. C'est donc le rapprochement de différents domaines d'expertises (sciences cognitives, design des interactions, développeurs informatique, architecte système, ...) qui concourent à la conception des interfaces. Il n'existe pas une solution unique à chaque conception d'interface, et il n'existe pas de solution optimale car son évaluation dépend de chaque utilisateur potentiel. Nous allons dorénavant effectuer un état des lieux des différentes méthodes existantes dans le génie logiciel et qui permettent de concevoir et d'évaluer des interfaces homme-machine.

III.1.2 Méthodes de conception et d'évaluation des interfaces

Les applications dont font partie les interfaces homme-machine nécessitent l'adjonction de différentes expertises pour pouvoir être conçues et réalisées dans les meilleures conditions. Le génie logiciel a développé de nombreux concepts de développement, notamment celui de la méthode de conception en V (fig.44) et la méthode en cascade (fig. 45). D'autres méthodes comme la méthode en étoile ou la méthode en spirale existent mais ne font pas l'objet de commentaire dans cet écrit.

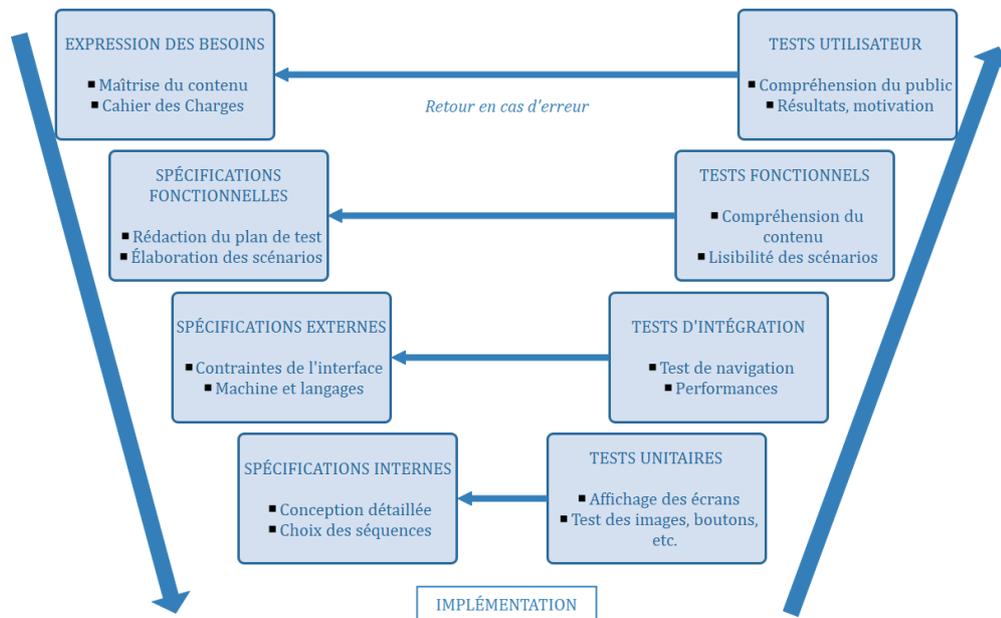


Figure 44: Cycle de conception en V des IHMs.

La méthode en V, la plus fréquemment citée, définit les exigences métiers permettant de définir précisément l'expression des besoins en termes de finalité d'usage pour les utilisateurs, puis par ruissellement successif, de descendre jusqu'au niveau des métaphores d'interaction où les boutons, et les éléments de restitution sont construits puis testés pour vérifier la pertinence, pour l'individu, de leur géométrie et de leur comportement dans l'interface. Les spécifications fonctionnelles permettent la mise en place de scénarios d'usage des interfaces qui ordonnera les séquences d'interaction successives pour effectuer les tâches d'usage de l'application. Enfin les spécifications externes permettent d'atteindre les performances prévues dans le cadre de l'utilisation de l'application conçue.

L'avantage de cette technique est de faire appel à des « bêta-testeurs » (des usagers cibles de l'application) à différents moments pour tester au fur et à mesure les éléments programmés dans l'application. Le défaut en revanche, est que cette méthode est extrêmement chronophage, les utilisateurs devant se déplacer plusieurs fois au cours du développement de l'interface.

La technique de conception en cascade est beaucoup plus simple dans son fonctionnement car linéaire. Elle ne permet un retour en arrière qu'à la phase de validation où tous les tests sont effectués au même moment avec un utilisateur cible. La méthode en cascade est donc moins chronophage pour les bêta-testeurs qui ne font un retour que lors d'une seule session. Cette technique est préférable pour les bureaux de développement n'ayant pas à disposition les utilisateurs cibles. Cependant, les erreurs de conception sont corrigées plus tardivement.

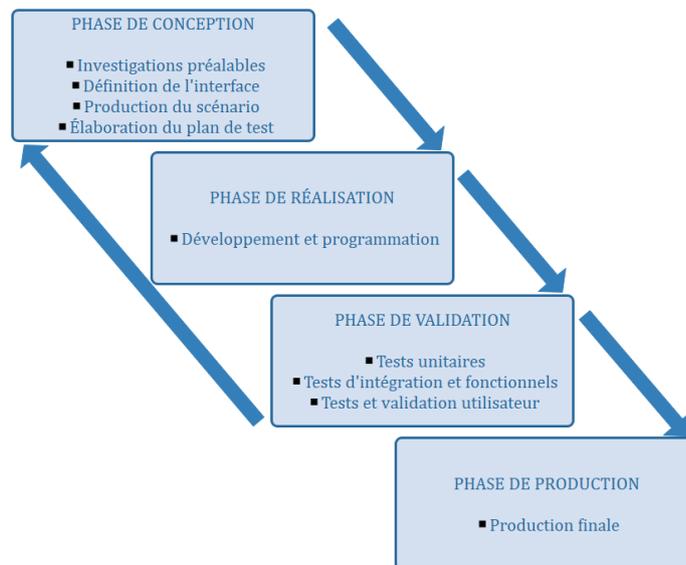


Figure 45: La méthode en cascade de conception des interfaces.

Ces deux méthodes font notamment partie de ce que les experts du génie logiciel nomment l'approche empirique de l'évaluation d'une interface. Cette approche empirique, menée à l'aide d'utilisateurs permet d'effectuer au plus près de la réalité du terrain où sera utilisé l'interface, un recueil de données et d'analyse d'usage. Kolski (Kolski, 1995) considère deux types d'approches d'évaluation des interfaces (fig.46) :

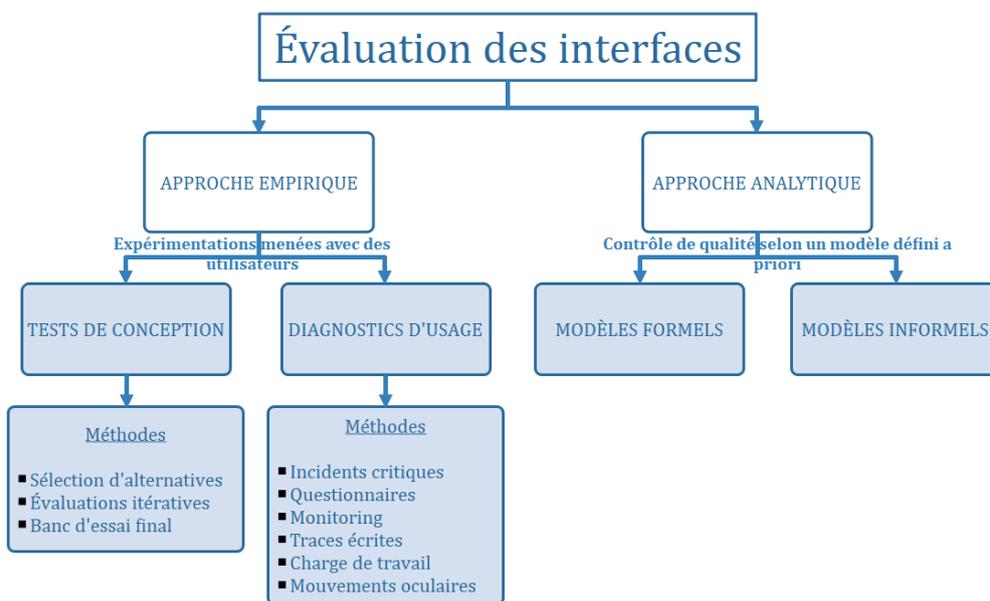


Figure 46: Deux approches possibles pour évaluer une interface conçue. D'après (Kolski, 1995).

1. L'approche empirique : l'utilisateur cible effectue, soit des tests spécifiques comme définis dans la méthode en V, en l'occurrence des tests ciblés réalisés tout au long de la phase de conception de l'application, soit des diagnostics d'usage dont l'approche plus globale associée à des techniques de validation telles que le monitoring ou « mouchard électronique » qui permet le recueil de données

d'exploitation tout au long du test d'usage, le suivi des mouvements oculaires à l'usage ou bien encore le questionnaire d'utilisation, l'interview avec le participant à travers un entretien, etc.

2. L'approche analytique permet l'évaluation a priori de l'interface selon des critères définis dans des modèles formels prédictifs (modèle GOMS, Keystroke, etc...) ou informels via l'intervention d'un spécialiste, des grilles d'évaluation, etc.... Nous ne rentrons pas dans le détail de cette approche au sein de ce manuscrit car ces modèles n'ont pas d'intérêt dans le cadre de cette thèse.

Dans le cadre des approches empiriques d'évaluation des interfaces, les dimensions mesurées sont trop souvent celles de l'utilisabilité de l'interface. Ces tests d'utilisabilité des interfaces ont notamment émergé grâce aux travaux de Norman et Draper, évoqués en début de ce chapitre. Ces travaux portaient sur la notion de conception centrée sur l'utilisateur (CCU). Cette notion de conception centrée sur l'utilisateur a été formalisée dans la norme ISO 13407 (**International Organization for Standardization, 1999**). Cette norme invite les développeurs à intégrer les utilisateurs finaux dès le début du cycle de conception de l'application et même de développer celle-ci avec eux. Par ailleurs, la norme considère qu'il faut apporter un soin tout particulier à l'analyse de l'activité, par l'analyse de l'usage que font les individus de l'application au travers de l'interface. Cette norme a été révisée en 2010 et a donné lieu à la rédaction de la norme ISO 9241-210 (**International Organization for Standardization, 2010**) dont nous évoquons la définition d'une interface en début de ce chapitre. Il a par ailleurs été intégré au sein de celle-ci, la notion d'expérience utilisateur (UX pour *User eXperience*, voir fig.47).



Figure 47: La prise en compte de l'usage d'un produit selon la notion d'UX. Le produit n'est plus pensé selon des critères intrinsèques (ici, la saveur du ketchup, le packaging attractif) mais aussi en termes d'usage. Crédits photo : Lifelong Learning Institute.

La norme ISO d'origine avait défini comme objectif de garantir l'utilisabilité du système interactif à l'usage. L'utilisabilité du système devait permettre d'atteindre les objectifs d'utilisation prévus avec *efficacité*, *efficience* et *satisfaction*. La norme de 2010, avec l'introduction de la notion d'UX (expérience utilisateur) élargit le spectre des objectifs visés avec la prise en compte des aspects émotionnels lors de l'interaction avec un système interactif. L'UX est dorénavant associée à une méthode de conception des interfaces : la méthode de Design UX. Nous reviendrons plus longuement sur les concepts

associés à la notion d'UX au [chapitre III de la partie DEUX](#). Nous expliquerons notamment quels modèles de l'expérience utilisateur permettent de prendre en compte le système interactif en usage par un individu possédant lui-même des caractéristiques propres à sa personne, et évoluant dans un contexte d'usage lui-même fortement impactant sur le ressenti du système interactif par l'individu.

III.1.3 Interactions dans les interfaces homme-machine

Pour pouvoir caractériser un interacteur contenu au sein d'un espace vectoriel, il est nécessaire de commencer par déterminer celui-ci en premier. Un espace vectoriel d'interaction dans un système interactif à restitution visuelle peut être bidimensionnel ou tridimensionnel. La représentation 2D ou 3D de l'espace conditionne les géométries et les comportements ainsi que les possibilités d'interaction avec les interacteur contenus dans cet espace vectoriel.

Les interacteurs communs d'un espace vectoriel 2D sont communément appelés des WIMP, pour *Windows, Icons, Menus, Pointer*. Ces interacteurs développés en 1973 par les ingénieurs de la société Xerox sont toujours majoritairement utilisés dans les applications nécessitant un espace de travail bidimensionnel exclusif. L'information contenue dans l'interacteur est figée (fig.48 à gauche) et ne permet pas une visualisation du contexte dans lequel s'insère celui-ci. Selon Lecolinet & Pook ([Lecolinet and Pook, 2002](#); [Lecolinet, 2003](#)), l'espace informationnel fourni par la géométrie de l'interacteur est alors trop limité pour permettre une compréhension globale des informations contenues par l'interacteur lui-même. Les chercheurs considèrent que seul le focus est fait sur l'information à un instant donné sans explicitation de son contexte. L'apport de contextualisation générée par l'ajout de comportement à la métaphore d'interaction permet de résoudre ce problème (fig.48 à droite).

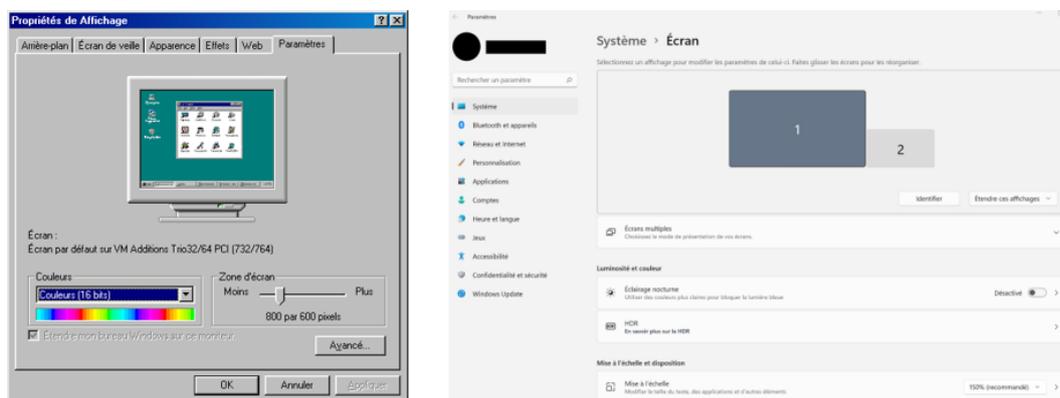


Figure 48: A gauche, un espace vectoriel 2D. L'interacteur (la fenêtre des paramètres d'affichage) est décontextualisée car nous ne savons pas dans quel contexte s'insère les « Propriétés de Affichage ». A droite, un espace de représentation 2D contextualisé. La fenêtre s'insère dans l'ensemble des paramètres du système dont l'architecture globale est visible dans le ruban à gauche.

L'adjonction de la profondeur dans l'espace 2D ajoute des possibilités d'ajustement des informations contenues à l'écran par l'intermédiaire d'éléments connexes qui gravitent autour de l'interacteur sélectionné ([Card et al., 1996, 1991](#)). Les liens relationnels entre les différents interacteurs composant le contexte sont imbriqués les uns aux autres par des liens de déformation. Ainsi, quand l'un augmente de taille, les autres rétrécissent permettant ainsi d'attirer l'attention de l'utilisateur via un gauchissement au cours du temps, des éléments d'interaction au sein du système de restitution visuelle (fig.49). Il existe plusieurs types de comportements qui ont fait l'objet d'études ([Pook, 2001](#)) mais

que nous n'exposerons pas dans ce manuscrit, leurs précisions relevant plus du détail pour notre sujet de thèse.

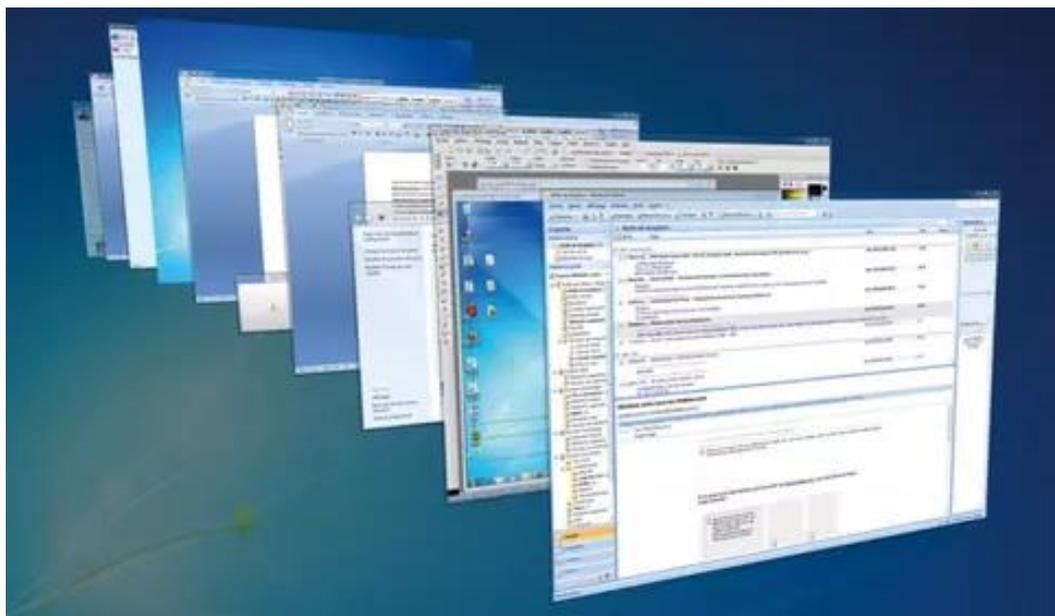


Figure 49: Un espace de représentation 3D dans un dispositif de visualisation 2D. *Crédits photo :* <https://www.01net.com/astuces/des-ruses-pour-mieux-bosser-513090.html>

Ce paradigme d'interacteur basé sur la notion de « focus+contexte » a permis l'apparition de métaphores d'interaction 2D possédant des degrés de liberté supérieures aux précédentes. Typiquement, les logiciels de CAO 3D (SolidWorks, CATIA, Inventor, ...) ont été développés sur la base de travaux où des interacteurs avaient des compétences de gestion de la profondeur au sein de ces espaces de représentations 2D.

L'émergence de technologies d'immersion dans un espace vectoriel 3D pose les bases d'une refonte des interacteurs, nécessaires notamment pour la navigation au sein de cet espace car l'immersion requiert alors de repenser, soit la géométrie des interacteurs, soit la méthode pour interagir avec les objets dans cet espace.

Les espaces de représentation 3D dans les technologies immersives sont qualifiés dans la Littérature d'environnements virtuels (**Bowman and Hodges, 1997**; **Ivan Poupyrev et al., 1998**; **Jung et al., 2014**). La navigation et la manipulation des objets dans cet espace de représentation doivent être repensées et restructurées pour prendre en compte la pleine et entière dimension de profondeur qui n'était précédemment qu'utilisée de manière passive par les interacteurs basée sur la notion de « focus+contexte ». Poupyrev et alii (**Poupyrev et al., 1996**) ont développé une métaphore basée sur l'extension d'un bras virtuel (nommée « Go-Go Interaction Technique ») pour manipuler un objet à distance (fig.50 (à gauche)). Ici, la métaphore naît de la nécessité de devoir manipuler des objets qui ne sont pas directement à portée. Cette nécessité ne peut être effective qu'à l'aune de l'adjonction de la dimension supplémentaire de profondeur à l'espace vectoriel 2D qui formait auparavant le plan.

Bowman et Hodges (**Bowman and Hodges, 1997**) ont investigué l'utilisabilité de la métaphore d'interaction « Go-Go » avec différentes autres techniques d'interaction, notamment le Ray-Casting (fig.50 (à droite)).

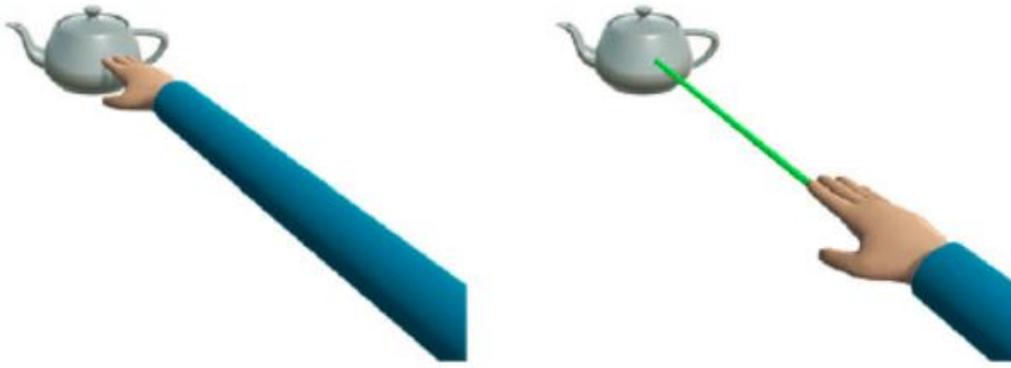


Figure 50: Sélection d'un objet à distance avec deux techniques d'interaction différentes : A gauche, la technique Go-Go consistant en un allongement d'un bras virtuel. A droite, le Ray-Casting consistant en un pointeur laser qui viendrait "percuter" l'objet afin de pouvoir le manipuler. *Crédits photo: D'après (Mendes et al., 2019).*

L'étude montre une très légère supériorité de la technique de Ray-Casting car les utilisateurs la considéraient alors comme moins exigeante physiquement. Plus tard, Poupyrev et alii ont proposé une classification des différentes techniques d'interaction 3D (I. Poupyrev et al., 1998; Ivan Poupyrev et al., 1998). Cette classification explicitée à la figure 51, définit préalablement deux classes métaphoriques : les métaphores égocentriques, et les techniques d'interaction exocentriques.

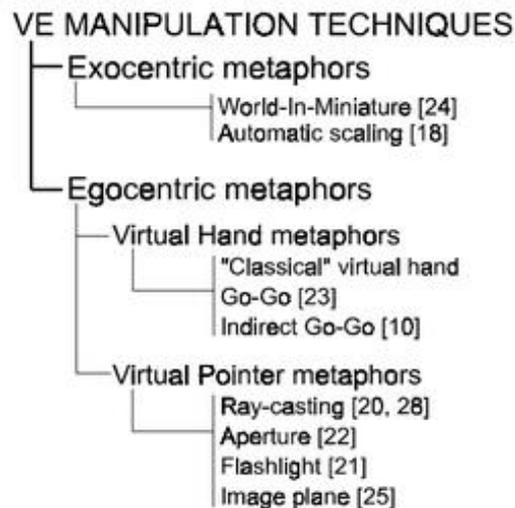


Figure 51: Classification des différentes métaphores d'interaction dans un environnement virtuel en 3D. D'après (Ivan Poupyrev et al., 1998).

Les techniques égocentriques sont utilisées du point de vue de l'individu, ce dernier étant intégré à l'environnement. Parmi ces techniques, une classification basée sur la technique de manipulation discrimine les techniques. Une première, la main virtuelle (Virtual Hand) peut, selon les auteurs : « *toucher et sélectionner* les objets avec une représentation virtuelle de leur propre main ». La seconde technique, est basée sur la manipulation indirecte des objets par la manipulation d'un objet virtuel, un pointeur laser (Virtual Pointer). Dans ce cas, les chercheurs posent le problème de sélection/désélection de l'objet manipulé avec l'objet virtuel qu'est le pointeur laser lui-même. Les techniques modernes de manipulation des objets virtuels utilisant la technique du Ray-Casting impose l'effectivité d'un geste supplémentaire pour gérer cette sélection/désélection : Par exemple, dans l'Hololens 2, un geste nommé AirTap est effectué pour réaliser les

opérations d'accroche et de décrochage du pointeur laser par rapport à l'objet virtuel manipulé. La figure 52 montre comment ce geste est effectué au sein de l'interface du dispositif interactif.

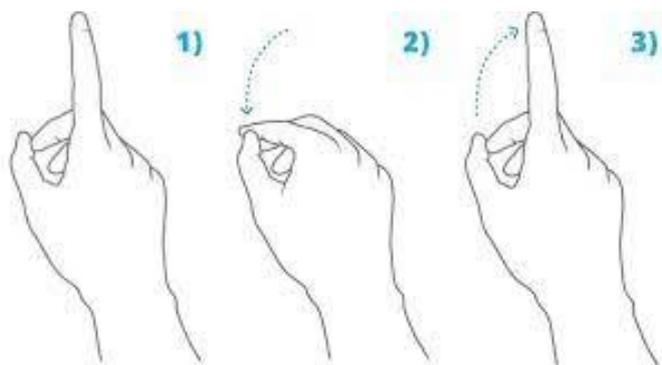


Figure 52: La technique du AirTap présente dans l'Hololens 2 Permet d'accrocher ou de décrocher un objet du pointeur laser (métaphore du Ray-Casting) émanant de la paume de la main de l'individu.

Les techniques de métaphores exocentriques utilisent le principe du « *God's Eye Viewpoint* » pour fonctionner. Dans cet environnement virtuel, l'individu manipule les objets virtuels à l'aide d'une représentation en miniature qu'il tient à la main, c'est la métaphore du monde miniature (*World-In-Miniature*). Un autre cas possible est la manipulation de l'échelle du monde virtuel afin que les objets lointains puissent être accessibles, c'est la métaphore de l'échelonnement automatique (*Automatic Scaling*).

Les études effectuées par Poupyrev et alii (**I. Poupyrev et al., 1998**) montrent une efficacité plus grande du Ray-Casting sur la technique Go-Go, notamment lorsque ceux-ci se situent à proximité (entre 0,7 et 2 « coudées virtuelles » soit environ entre 30cm et 84cm). Au-delà, les résultats montrent une efficacité similaire des deux métaphores. Une autre étude effectuée par les mêmes chercheurs (**Ivan Poupyrev et al., 1998**) montre que la transformation de la distance spatiale d'un objet lors de sa manipulation évolue si l'on prospecte les écarts de distance entre la prise et le relâchement. Les tests ont été effectués sur une manipulation spatiale à distance constante (0,8 coudée virtuelle soit environ 34cm) puis sur un allongement de la distance (de 0,8 à 1 coudée soit de 34cm à 42cm), enfin sur une réduction de cette distance (de 1 à 0,8 coudée soit donc de 42cm à 34cm). Les résultats exposent une supériorité du temps de manipulation du Ray-Casting à distance constante, puis une très légère supériorité de la technique Go-Go lorsque les distances diffèrent. Finalement, les deux techniques sont équivalentes en tous aspects et l'utilisation prioritaire de l'une ou l'autre sera conditionnée au confort d'utilisation de la métaphore plutôt qu'à l'aune de son efficacité.

En 1999, Bowman et Hodges (**Bowman and Hodges, 1999**) ont proposé une classification des techniques d'interaction, en décomposant les activités effectuées par un individus dans un environnement virtuel. De ces activités réalisées au sein de l'interface, découle le développement de métaphores d'interaction différentes. Par exemple, pour reprendre le cas des métaphores vues précédemment, l'adjonction d'une technique de manipulation d'objet par Ray-Casting nécessite qu'il faille : 1/un objet à manipuler ; 2/Une localisation de cet objet à une distance suffisante pour qu'il faille utiliser une métaphore spécifique à cette problématique.

L'apport fondamental des travaux de Bowman et Hodges provient du fait que chaque activité est décomposée en tâches élémentaires, ce qui permet la prise en compte de la spécificité de chacune d'entre elles dans la conception des métaphores d'interaction contenues dans l'interface. Bowman et Hodges ont proposé la classification en tâches élémentaires pour naviguer au sein de l'interface, et sélectionner/manipuler des objets

(fig.53). Cette classification des interacteurs est donc très fortement corrélée à l'utilisation que l'on fait de ceux-ci en situation d'usage de l'interface.

Le séquençage de l'activité effectué grâce à la découpe de celle-ci en tâches élémentaires permet de construire un mode opératoire où les interacteurs appropriés apparaissent au moment opportun de la séquence des tâches. Ceci permet d'éviter de surcharger l'interface d'interacteurs potentiellement inutiles à l'instant t et de concevoir les interacteurs les plus pertinents en fonction du type de tâche élémentaire. Ces interacteurs peuvent par ailleurs se retrouver dans les différentes catégories créées par Bowman et Hodges. L'émergence de nouveaux types d'interacteurs pourrait de surcroît venir enrichir les catégories déjà présentes voire en créer de nouvelles.

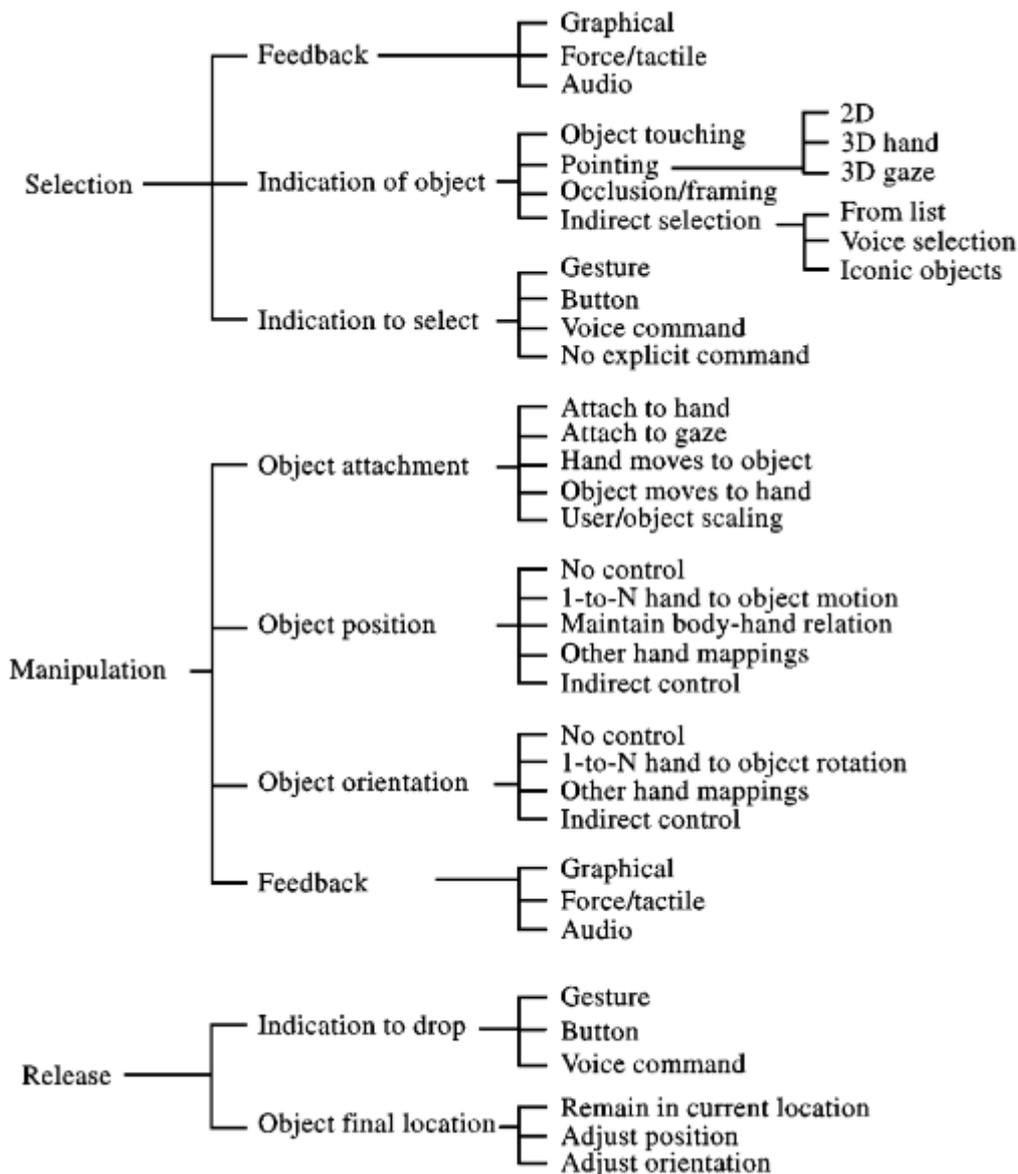


Figure 53: La classification en tâches élémentaires proposée par Bowman et Hodges (Bowman and Hodges, 1999).

Les travaux de Poupyrev ont été repris en 2014 par Jung et alii (Jung et al., 2014) qui ont proposé une classification raffinée à l'aune des techniques nouvelles de l'époque. La classification des métaphores egocentrique et exocentrique de Poupyrev et alii s'est donc subdivisée en trois sous-catégories (1/Direct Manipulation, 2/Physical Control et 3/Virtual Control). Les techniques d'interaction basée sur la manipulation directe

permettent d'utiliser les objets en les manipulant à l'aide de « leurs gestes intuitifs » (« *their intuitive motions* » dans le document). Les visiocasques de RA de type Hololens sont insérés dans cette catégorie. La seconde catégorie, contrôle physique est exercé à l'aide de métaphores symboliques comme les boutons, les curseurs, etc... Enfin, la troisième et dernière catégorie est celle des contrôles virtuels. Les auteurs parlent de n'importe quel interacteur virtuel qui peut générer une manipulation de l'objet dans l'environnement virtuel. Les chercheurs classent ainsi la main virtuelle de la technique Go-Go comme un contrôle virtuel.

Cette classification a ceci d'intéressant qu'elle implique les caractéristiques constitutives des technologies pour envisager le type d'interacteurs pouvant être utilisés. En effet, les spécificités technologiques résultantes du type de technologies qui restituent l'interface (technologie de réalité augmentée, réalité virtuelle, bras haptiques) influent directement sur la catégorie et les modalités d'interaction possibles dans l'interface.

Prospectons dorénavant le champ des technologies immersives et interactives, cadre de notre étude, et considérons les classifications des modalités d'interaction homme-machine qui y sont faites. En 1998, Mackay (**Mackay, 1998**) proposait de classer les technologies de réalité augmentée et les applications à l'aune des aspects interactifs qu'ils pouvaient permettre. Ainsi, l'auteur définit trois stratégies d'augmentation : augmentation de l'utilisateur ; augmentation de l'objet et augmentation de l'environnement entourant l'objet et l'utilisateur. L'augmentation de l'utilisateur est basée sur le fait que l'individu porte un système de RA et que celui-ci lui permet de pouvoir obtenir de l'information à propos des objets. L'exemple de visiocasques, de lunettes interactives (smart glasses) et de gants haptiques est donné. L'augmentation de l'objet est caractérisée par l'insertion de briques d'intelligence à l'intérieur de ceux-ci. Les capteurs usuels (luminosité, proximité, puces GPS, etc.), qui forment ce que l'on nomme aujourd'hui les *smart products* est opérée. Enfin, l'augmentation de l'environnement entourant les entités humaines et les artefacts virtuels est défini via des systèmes tiers (des projecteurs, des écrans) qui s'approprieraient l'information entourant l'individu afin de le restituer au travers de technologies de projection principalement.



Figure 54: Taxinomie de classification des techniques d'interaction au sein d'un système immersif interactif. D'après (**Papadopoulos et al., 2021**).

Cette classification a pour finalité de fournir un état des lieux de ce que les technologies permettent d'obtenir d'un point de vue des interactions mais ne rentre pas dans le détail de celles-ci. Les techniques et les métaphores d'interaction en sont pas évaluées à l'aune de ces technologies. Normand et alii (**Normand et al., 2012b**) considèrent par ailleurs que la classification n'aborde pas les problématiques de multimodalités interactives posées par des appareils de RA. La classification résultante caractérise selon nous plutôt les aspects matériels des technologies de RA plus que les aspects logiciels et ne lie, à aucun moment, les uns aux autres.

En 2021, Papadopoulos et alii (**Papadopoulos et al., 2021**) ont effectué une classification des différents types d'interaction existantes, tant du point de vue des modalités visuelles qu'auditives, haptiques et basées sur les capteurs embarqués dans les dispositifs immersifs. Ils appuient leur classification sur une taxinomie effectuée d'après la somme totale de publications qu'ils ont investigué pour pouvoir établir cette classification. Les techniques d'interaction sont classées par les auteurs comme suit (fig.54) : une modalité primaire basée essentiellement sur les sens humains qui peuvent être augmentés, soit une modalité visuelle (*visual-based*), une modalité auditive (*audio-based*), une troisième

haptique (*haptic-based*). Les auteurs évoquent les modalités basées sur les sens olfactif et gustatif sans les développer. Une dernière modalité est ajoutée. Celle-ci concerne le sens des machines, la perception basée sur des capteurs (*sensor-based*).

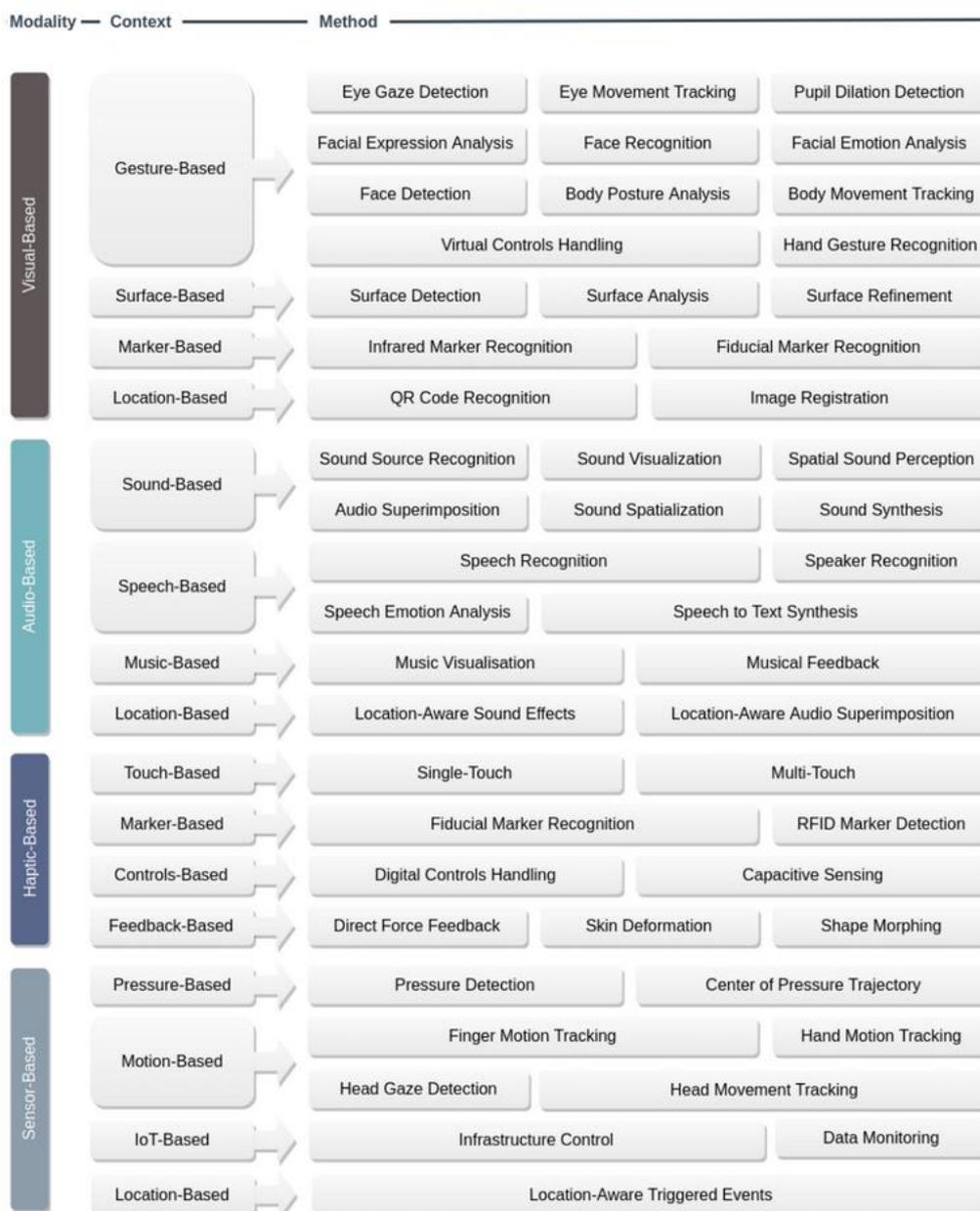


Figure 55: Une classification des techniques d'interaction. D'après (Papadopoulos et al., 2021).

A l'intérieur de ces différentes modalités, sont classés des contextes d'utilisation. Ces contextes sont très marqués par le contexte d'interaction (visuelle, auditive, etc.) avec la technologie. Par exemple, l'un des contextes basés sur la modalité visuelle utilise la gestuelle pour interagir avec la machine. Ce contexte est « basé gestuelle » (*gesture-based*). Parmi les éléments de contexte haptique, les auteurs ont créé un taxon « basé sur le toucher » (*touch-based*).

Enfin, dernière brique constitutive de la taxonomie réalisée par Papadopoulos et alii, la méthode elle-même. La classification de la technique interactive est plus finement décrite au sein d'un ensemble homogène dont le nom nous permet de placer (si nous faisons évoluer la classification) ou d'aller chercher (si nous utilisons simplement la base telle qu'elle se présente) une technique spécifique. Par exemple, à l'intérieur du contexte basé

gestuelle de la modalité visuelle, des méthodes sont intégrées telle la méthode de reconnaissance des gestes de la main (*hand gesture recognition*) ou encore la méthode de détection du regard (*eye gaze detection*). Côté haptique, dans le contexte basé sur le toucher, les méthodes de toucher simple (*single-touch*) ou de toucher multiple (*multi-touch*) sont intégrées. Le diagramme exposé en figure 55 explicite l'ensemble des modalités, de leurs contextes et des méthodes associés au sein de la classification globale.

Cette classification portée par Papadopoulos et alii est davantage tournée vers ce que les spécialistes appellent des NUI, pour *Natural User Interfaces*, ou Interfaces Utilisateurs Naturelles, en opposition avec les plus anciennes interfaces basées sur le modèle WIMP, où les moyens d'interactions avec l'interface homme-machine est basée sur des échanges dits « naturels ». Ce type d'échange peut prendre par exemple la forme d'un bouton virtuel sur lequel nous viendrons appuyer et dont l'affordance serait perçue spontanément par l'utilisateur de l'interface car ce type d'interaction est très commune dans l'espace purement réel avec lequel nous interagissons tous les jours. De même, un objet virtuel qui pourrait être manipulé directement dans l'espace 3D par les propres mains de l'utilisateur permettrait une manipulation plus aisée des interacteurs. Cette utilisation des interacteurs doit cependant être accompagnée d'une métaphore d'interaction claire qui permette de comprendre aisément comment se manipule celui-ci. Cette compréhension naturelle constitue l'affordance.

III.1.4 Mesure de la pertinence des métaphores d'interaction

Le concept d'affordance est né d'un article écrit par Gibson en 1977 (Gibson, 1977). Ce concept a été repris et élaboré par Norman en 1988 (Norman, 1988) dans lequel l'auteur expose entre autres, le cas de l'affordance perçue par rapport à l'affordance réelle. Il expose notamment le cas d'une interface graphique en disant la chose suivante : « *Dans les interfaces graphiques, basées sur l'écran, le concepteur ne peut principalement contrôler que les affordances perçues. Le système informatique est déjà doté d'affordances physiques intégrées. L'ordinateur, avec son clavier, son écran, son dispositif de pointage et ses boutons de sélection (par exemple, les boutons de la souris) permet de pointer, de toucher, de regarder et de cliquer sur chaque pixel de l'écran* »⁷. L'auteur scinde la manière dont l'interacteur se présente à l'utilisateur et ses qualités intrinsèques de manipulation dans l'espace vectoriel (qu'il soit 2D comme dans l'exemple de Norman ou en 3D comme à l'intérieur d'un dispositif de RA tel l'Hololens), on parle alors d'affordance perçue. L'affordance réelle représente elle, les qualités de mises à disposition d'interaction qu'offre l'appareil. Un ordinateur fournit un moyen d'interagir avec les éléments via un clavier, un écran et une souris, plutôt basée sur le modèle d'interaction WIMP donc, quand un visiocasque de RA comme l'Hololens permettra d'interagir avec des interacteurs possédant d'autres type de manipulation, plutôt basées sur le modèle NUI.

A l'intérieur de ces modèles (WIMP et NUI), des spécificités technologiques augmentent ou diminuent les moyens d'interaction avec l'interacteur dans l'interface. Par exemple, l'Hololens de 1^{ère} génération ne permet pas d'utiliser la méthode de *Eye Movement Tracking*⁸ (voir la méthode dans la classification de Papadopoulos et alii en figure 55 : *Visual-Based – Gesture-Based – Eye Movement Tracking*) mais autorise la technique d'interaction du *Body Movement Tracking* (voir la méthode dans la classification de Papadopoulos et alii en figure 55 : *Visual-Based – Gesture-Based – Body Movement Tracking*). L'utilisateur devra suivre les éléments virtuels qu'il souhaite déplacer dans l'espace par un mouvement de la tête et non des yeux. A contrario, l'Hololens 2 permet les deux types d'interaction au sein de l'interface. A ce stade, point d'évaluation subjective de

⁷“*In graphical, screen-based interfaces, the designer primarily can control only perceived affordances. The computer system already comes with built-in physical affordances. The computer, with its keyboard, display screen, pointing device, and selection buttons (e.g., mouse buttons) affords pointing, touching, looking, and clicking on every pixel of the screen*”.

⁸ Sur les possibilités d'interaction basées sur la détection du regard dans les systèmes de RA Hololens : <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/design/eye-gaze-interaction>

la prééminence de telle ou telle méthode interactive, il convient simplement de juger du caractère de disponibilité offerte aux développeurs de pouvoir générer des interacteurs ayant une affordance perçue basée sur telle ou telle méthode interactive à sa disposition.

La métaphore d'interaction est donc à l'intersection de l'affordance perçue qu'elle génère, intimement liée aux capacités du développeur de créer de l'affordance au sein de ses interfaces, et de l'affordance réelle, assujettie aux possibilités d'interaction offertes par le fabricant dans la construction de son dispositif interactif comme l'illustre la figure 56.

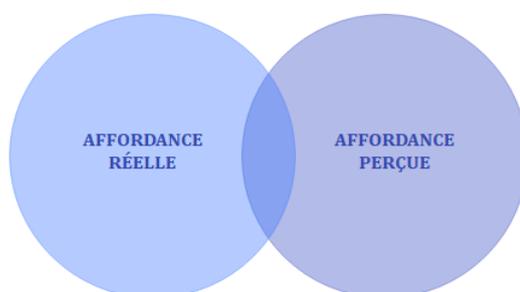


Figure 56: La métaphore d'interaction est une construction de deux affordances, matérielle et logique, dont la mise à disposition de l'une (affordance réelle), permet le développement possible de l'autre (affordance perçue).

Le développement des NUI a été introduite par Steve Mann dans les années 90. Le chercheur souhaitait développer des interfaces libérées des métaphores informatiques (« *metaphor-free computing* »). Dans cette optique, il a développé le Eye-Tap, une technologie qui permet de capturer la scène perçue par l'individu à l'aide d'une caméra portée devant son œil, et qui génère par la suite, une scène où serait superposées des images virtuelles disponibles pour l'œil via un système de restitution visuel dédié.

Au début de leur existence, et à l'aube des premières métaphores d'interaction qui ont été créés pour interagir avec ce type d'interacteurs, les résultats montraient une réaction mitigée des utilisateurs. En 2009, Bérard et alii (**Bérard et al., 2009**) ont effectué une étude comparative à l'utilisation de quatre types d'interfaces :

- Une première dans un espace vectoriel 2D, à l'aide d'une souris concédant 2 degrés de liberté dans l'interface ;
- Une seconde ajoutant de la profondeur toujours avec une souris et un « *slider* » autorisant 3 degrés de liberté ;
- Une troisième en utilisant le système *SpaceNavigator*TM, permettant 6 degrés de liberté dans l'interface ;
- Une quatrième interface utilisant une télécommande pour sélectionner/désélectionner des boutons et un moyen de capture de mouvement au sein d'un espace libre à l'aide de réflecteurs infrarouges. Ce système admettait 6 degrés de liberté.

L'objectif fut de mesurer la performance lors du placement d'un cube blanc sur un cube rouge. Les auteurs ont mesuré le temps de placement pour chacun des 10 utilisateurs sollicités, les défauts de placement et les signaux biologiques (battements cardiaques, etc..) lors du test. Les résultats montrent une nette suprématie des moyens d'interaction 2D sur les moyens 3D, les deux moyens 2D étant équivalents entre eux. Les auteurs notent une hausse comprise entre 30% et 40% du temps nécessaire pour placer le cube blanc dans l'environnement 2D par rapport à l'environnement 3D. Concernant les erreurs de placement, l'environnement 3D de la quatrième interface est générateur d'une

significative hausse par rapport aux autres moyens sans que les auteurs ne donnent un ordre de grandeur.

Bérard et alii associent les difficultés rencontrées par les utilisateurs dans la quatrième interface, à des problématiques de « sautillerment » du suivi (*tracking jitter*) ainsi qu'à des mouvements parasites induits par le fait de sélectionner/désélectionner les objets via la télécommande. Une analyse approfondie montre les difficultés du système 4 à permettre la sélection fine des éléments dans l'interface. Finalement, l'incapacité à fournir une affordance réelle par le dispositif, via ses qualités interactives intrinsèques, semblent avoir eu raison des performances dans cette étude.

En 2021, une étude portant sur l'assemblage de composants dans un environnement CAO à l'aide de deux types d'interface, une première 2D, une seconde 3D basée sur les nouvelles méthodes interactives a été réalisée (Fechter et al., 2022). L'environnement 2D était composé d'un ordinateur de bureau avec un écran, une souris et un clavier pour moyens d'interaction nommé par les chercheurs « Desktop ». L'espace 3D était généré via un visiocasque Oculus Rift accompagné de deux caméras infrarouges. Ce système était nommé « VR environment ».

L'objectif était dual : premièrement, une relocalisation d'objet 3D sur une cible avec une mesure du temps effectif réalisé par chaque participant. Il y avait trois tâches à faire :

1. Déplacer l'objet selon un seul axe (1D) ;
2. Déplacer l'objet selon 3 axes de translation ;
3. Déplacer l'objet selon 6 axes, trois axes de translation, trois de rotation.

Second objectif, il fallait réaliser un assemblage de deux pièces ensemble et de trois pièces sur une pièce principale, un cylindre moteur. Pour ces deux objectifs, deux essais furent possibles pour les individus.

Les mesures évaluatives portaient sur le temps, de relocalisation et d'assemblage des pièces, mais aussi sur la base de la complétion, par les participants, d'un questionnaire d'utilisabilité (questionnaire SUS)⁹. Dix individus ont participé à cette étude, neuf hommes, une femme.

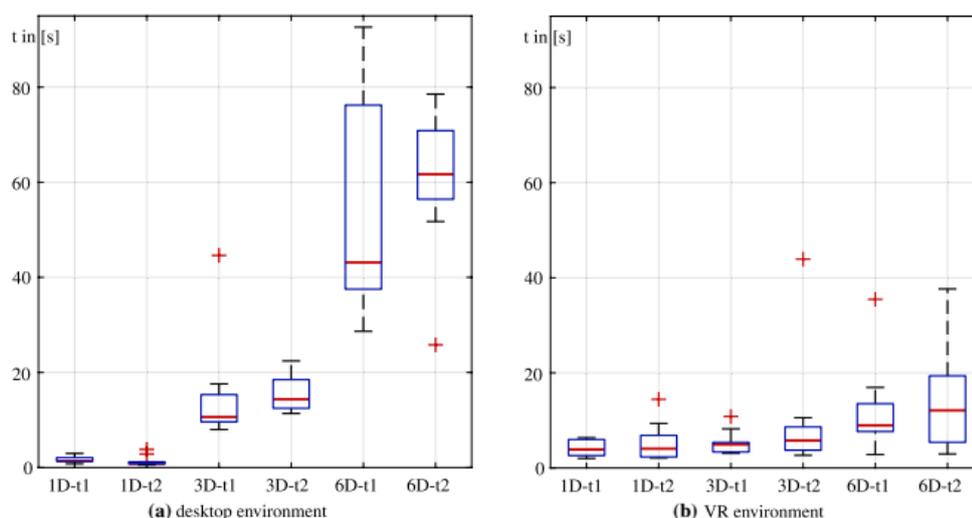


Figure 57: Relocaliser un objet dans l'espace virtuel selon trois types de tâches : 1D, 3D et 6D, et pour deux types d'interfaces, une interface 2D et une autre 3D. D'après (Fechter et al., 2022).

⁹ Nous reviendrons sur le questionnaire SUS, ses fondements, ses objectifs, dans la partie DEUX, chapitre III, section 2 : « Les moyens de validation empiriques de notre méthodologie expérimentale ».

Les résultats du premier objectif (relocalisation d'objet) montre une supériorité des interactions 2D dans les cas de la relocalisation selon un seul axe (1D) par rapport à l'environnement 3D (val.moy.resp. : 1,50s contre 4,7s). En revanche, dès l'ajout de dimensions supplémentaires les résultats s'inversent et le système interactif 3D devient très performant par rapport au système 2D (val.moy.resp. : 15,30s contre 7,40s pour la tâche 3D et 57,90s contre 13,10s pour la tâche 6D). Les résultats spécifiques à chaque essai sont disponibles dans la figure 57.

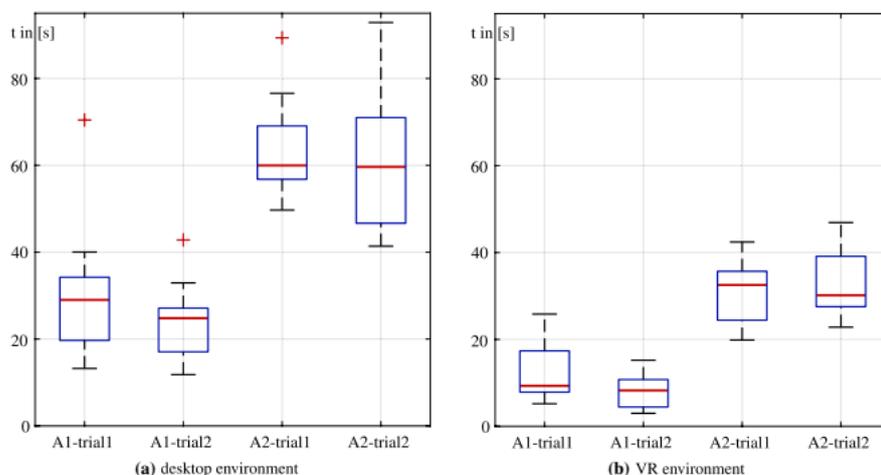


Figure 58: Assembler des objets dans l'espace virtuel deux types d'interfaces, une interface 2D et une autre 3D. D'après (Fechter et al., 2022).

L'objectif second d'assemblage de pièces sur un sous-ensemble dédié montre ici encore la supériorité des interactions 3D sur celles 2D pour l'assemblage des deux pièces (val.moy.resp. : 10,00s contre 27,80s) comme pour l'assemblage des composants sur l'ensemble cylindre moteur (val.moy.resp. : 31,50s contre 62,34s). Les résultats spécifiques à chaque essai sont disponibles dans la figure 58.

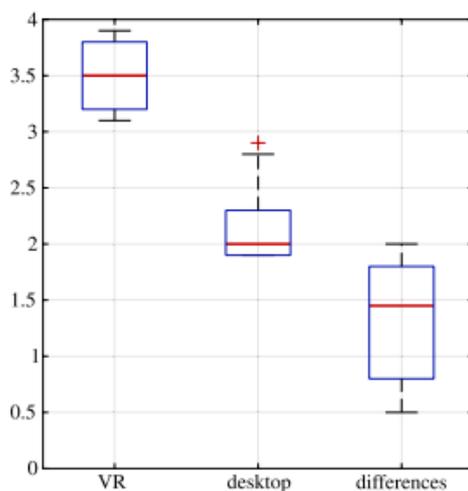


Figure 59: Les résultats d'utilisabilité pour chaque système interactif et la différence de perception. D'après (Fechter et al., 2022).

Du point de vue de l'utilisabilité de chaque système interactif, le questionnaire administré, permettait à chaque candidat d'évaluer le système suivant 10 questions notées entre 0 et 4. Dans ce contexte d'utilisation, les résultats, visibles en figure 59, montre une évaluation moyenne d'utilisabilité pour le système 2D plutôt mitigé (2/4). En revanche, le système 3D semble être bien apprécié par les participants avec une note moyenne de ce système

de 3,5/4. Reportés sur l'échelle établie par le créateur du questionnaire SUS, les systèmes 2D et 3D atteignent respectivement 54,5 points sur 100 contre 87,75 points sur 100.

Les auteurs ne statuent pas sur le pourquoi de l'effectivité des interacteurs 3D par rapport aux interacteurs 2D en dehors du système de « *reconnaissance automatique des contraintes basées sur une manipulation efficace par l'interaction naturelle des doigts*¹⁰ ». Ils ne situent pas l'éventuelle supériorité du système 3D eu égard à un contexte spécifique d'utilisation des interactions. Les auteurs n'ont pas non plus considéré l'évolution des usages au cours du temps.

Les techniques interactives basées sur les NUI ont prospéré au cours du temps. Celles-ci, présentent notamment dans le domaine des jeux vidéo (la télécommande de la Wii qui permet de retranscrire les gestes effectués par les individus (dès 2008), ou encore le système Kinect qui autorise, par reconnaissance des mouvements corporels et interaction vocale, d'interagir dans le jeu (dès le début de l'année 2011)) ont-elles permis un apprentissage au cours du temps de la part des individus qui ont intégrés ces métaphores d'interaction et qui de fait, se trouvent plus performants en 2021 que lors de l'étude précédemment effectuée par Bérard et alii en 2009 ? Quid de ce qui relève d'un apprentissage au cours d'un temps plus ou moins long ou bien d'une nouvelle métaphore d'interaction si efficace que l'apprentissage effective de son utilisation évoluerait très rapidement ?

Pour répondre à ces questions, il nous faut interroger le système cognitif humain, de connaître son fonctionnement intrinsèque et d'élaborer les concepts d'interfaces interactives permettant un apprentissage de l'homme à l'interaction avec la machine sans base théorique préalable obligatoire ni processus d'apprentissage long et fastidieux. C'est l'objet de la prochaine section de ce chapitre : les interactions homme-machine et la cognition humaine.

Section 2 Interactions Homme-Machine & cognition humaine

III.2.1 Quelques modèles de cognition humaine

La modélisation du processus cognitif humain est capitale pour pouvoir concevoir une interface interactive efficace pour l'utilisateur. En effet, les processus cognitifs mis en œuvre, leurs limites éventuelles, ainsi que le contexte dans lequel s'insère l'utilisation de l'interface ont un impact sur les performances à l'usage de l'interface par l'humain. Nogier et Leclerc (Nogier and Leclerc, 2016) expliquent que : « *la réalisation d'une tâche informatisée demande en fait de mener deux tâches en parallèle : d'une part la tâche métier, c'est-à-dire l'objectif que l'utilisateur cherche à atteindre vis-à-vis du monde extérieur, d'autre part la tâche système qui consiste à se servir du logiciel proprement dit* ». Les auteurs conviennent donc du fait qu'il faille faciliter au maximum l'utilisation de l'application afin de « *ne pas perturber la réalisation de la tâche métier* ». Ils concluent par l'idée que le refus de certains logiciels a été rendu effectif par le fait que la tâche système était prépondérante à la tâche métier. Bien connaître le processus cognitif permettrait donc d'amoindrir voire de supprimer cet effet de domination de la tâche système sur la tâche métier par un développement éclairé de l'application, en regard du fonctionnement cognitif humain.

Le premier modèle de cognition humaine (fig.60) et le plus simple est celui développé par Card et alii (Card et al., 1986) dans lequel les auteurs associent le cerveau humain à celui d'un processeur, analogue au processeur d'un ordinateur. Selon les auteurs, L'humain reçoit des informations provenant du monde extérieur à l'aide de son « *processeur perceptif* » qui traduit le tout en stimuli de différentes formes (stimuli visuels, haptiques,

¹⁰ "We strongly believe that this is a result of automatic constraint recognition based on efficient manipulation through natural finger interaction".

auditifs, olfacto-gustatifs). Ces derniers sont traités dans la mémoire à court terme via un processeur cognitif qui identifie et interroge au besoin, la mémoire à long terme afin de traiter les stimuli par le truchement de connaissances acquises tout au long de l'existence de l'individu. Ces connaissances peuvent prendre la forme de savoir théorique et/ou empirique, de représentations mentales, ou bien de croyances, etc.

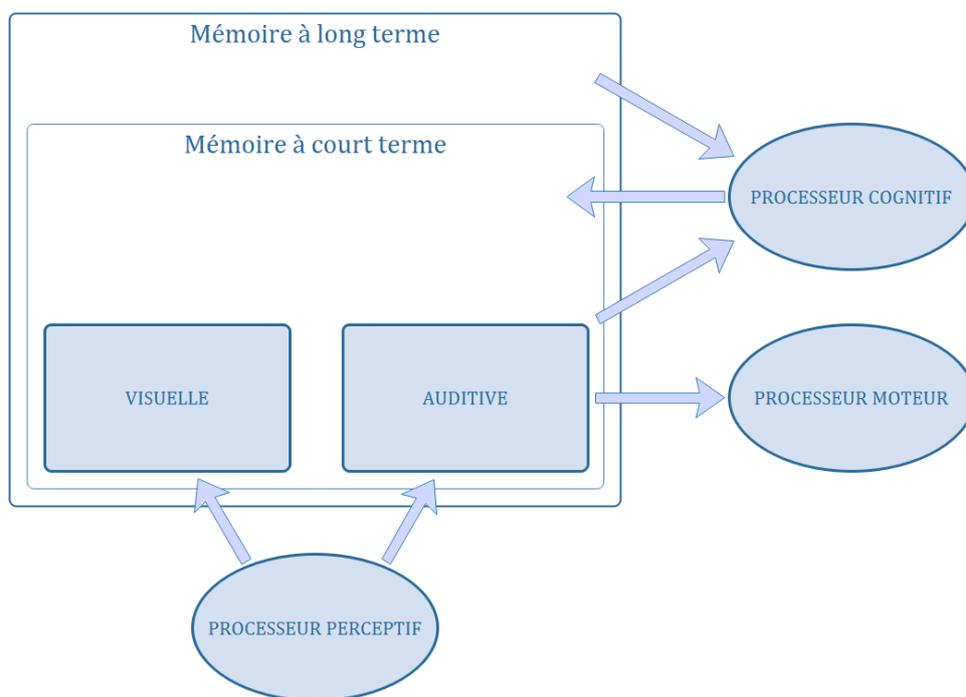


Figure 60: Le modèle de processeur humain selon Card & alii (Card et al., 1986). D'après (Kolski, 1995).

Le traitement effectué dans la mémoire à court terme permet à l'humain de mettre en marche le processeur moteur qui actionnera le corps via des stimuli cette fois, musculaires. Il est important de noter que selon les travaux de Miller (Miller, 1975) la mémoire de travail (ou mémoire à court terme) ne peut traiter qu'un nombre fini d'information. Selon le chercheur, cette quantité se situerait entre cinq et neuf informations soit l'intervalle bien connu de 7 ± 2 . Des travaux connexes (Broadbent, 1971) limitent ce nombre à quatre ou cinq, la quantité des informations restantes devant être associées avec les autres pour pouvoir être identifiables nettement. Nous ne rentrons pas dans les détails de mémorisation de tous les mnèmes (les informations contenues dans la mémoire de travail à un instant donné) au sein de ce manuscrit.

Autre modèle plus complet, car il regroupe les travaux de plusieurs chercheurs en sciences cognitive en un modèle unique, celui de Bellet (Bellet, 1998), exposé en figure 61. On retrouve dans ce modèle conceptuel, toutes les briques exposées dans le modèle de Card : la mémoire de travail appelée par Card et alii, mémoire à court terme, la mémoire à long terme, ainsi que le processus d'acquisition des informations perceptives dont les données de sortie sont les stimuli sensoriels, visuels, auditifs, etc., et le processus moteur. Par ailleurs, Bellet découpe le processus cognitif que l'on a exposé dans le modèle de Card en deux processus distincts, le premier, d'acquisition des connaissances, le second, de recouvrement de celles-ci en situation. En revanche, Bellet intègre plusieurs subtilités que nous exposons ci-après.

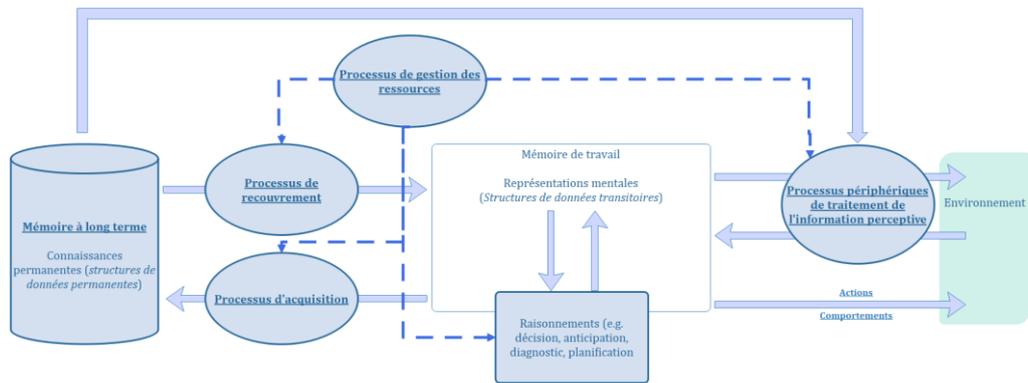


Figure 61: Le modèle de Bellet. D'après (Bellet, 1998).

Tout d'abord, la mémoire de travail constitue le cœur nucléaire où sont développées ce que le chercheur nomme des représentations mentales. Ces dernières sont le fruit, selon l'auteur, de « constructions circonstanciées faites dans un contexte particulier à des fins spécifiques ». Bellet ajoute que ces représentations mentales « s'inscrivent dans la poursuite d'un objectif particulier et prennent en compte les exigences ponctuelles ou générales de la tâche. C'est par l'entremise de ces représentations mentales fonctionnelles que l'humain interagit dynamiquement avec son environnement, et qu'il s'y adapte. Elles vont intervenir dans le traitement de l'information, comme dans la régulation des comportements du sujet ». La compréhension de son environnement par les moyens de perception dont dispose l'individu d'une part, mais aussi l'activation des connaissances stockées dans la mémoire à long terme, permettent la génération d'un contexte d'utilisation utile à la complétion des objectifs de la tâche.

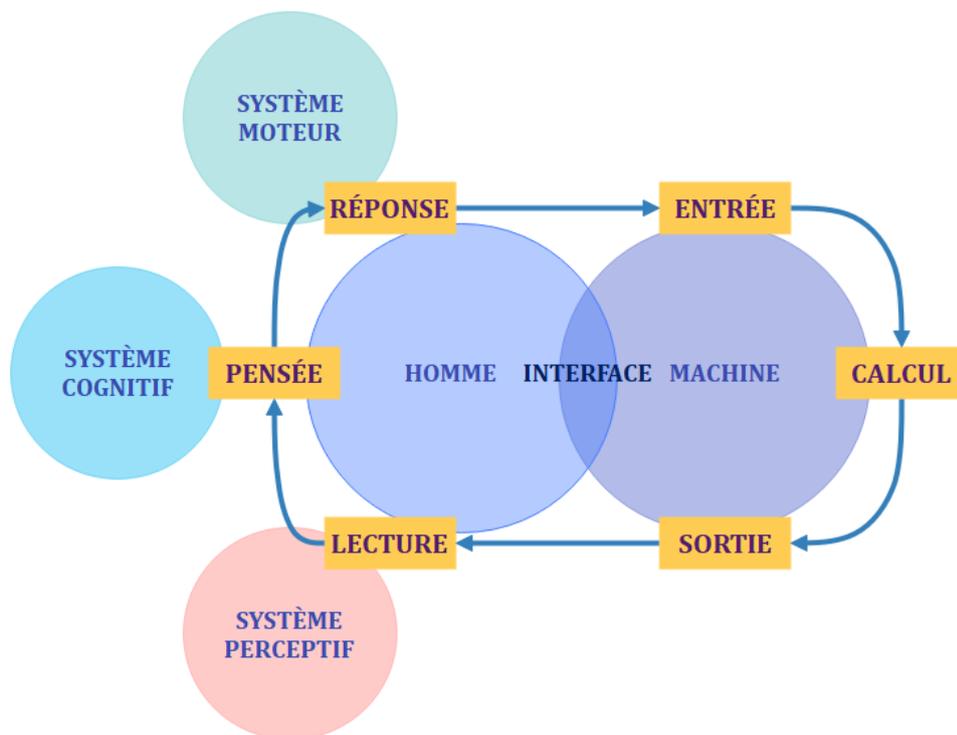


Figure 62: Le cycle d'interaction homme-machine dans une interface interactive. D'après (Nogier and Leclerc, 2016).

Par ailleurs, Bellet définit ces représentations mentales comme des « instanciations des connaissances du réel ». Par conséquent, le contexte généré est orienté par le processus de raisonnement au sein de cette mémoire de travail. Cette dernière n'est donc plus une simple boîte d'enregistrement des stimuli perçus auxquels viendraient se greffer des connaissances acquises sur le long terme, donc un processus passif soumis aux sollicitations venant de l'environnement extérieur, mais un processus décisionnel d'anticipation, de diagnostic et de planification actif dont le contexte généré est le vecteur.

Le dernier point important que l'on ne trouve pas dans le modèle de Card et alii, est l'intégration par Bellet d'un processus de gestion des ressources. L'existence de ce processus marque le fait que l'information traitée est limitée et qu'il faut nécessairement allouer des ressources cognitives aux opérations effectuées en parallèle au sein du système cognitif global. Cette allocation des ressources sera donc variable en fonction des individus et de leurs capacités cognitives respectives.

Nogier et Leclerc ont défini l'interaction homme-machine par un cycle de « questions/réponses » entre les deux entités, et visible en figure 62. Le logiciel effectuerait en sortie (« Sortie ») des informations perceptibles par le système humain dédié (« Lecture »). De ces stimuli traités au sein de son système cognitif (« Pensée ») adviendrait une réponse réalisée grâce au système moteur de l'homme dont les réponses musculaires (« Réponse ») seraient captées par le système interactif (« Entrée ») qui traiterait ces réponses moteur au sein de sa propre unité de calcul dédiée (« Calcul »). Chaque cycle serait ainsi produit et permettrait à l'homme et la machine de « discuter » par interaction mutuelle au cours du temps.

Nous avons repris ce schéma des auteurs et avons intégré nos briques de classification des technologies de RA à ce système d'interaction homme-machine. Le résultat exposé en figure 63 permet de visualiser comment la sollicitation de telle ou telle brique technologique permet l'interaction au cours du temps.

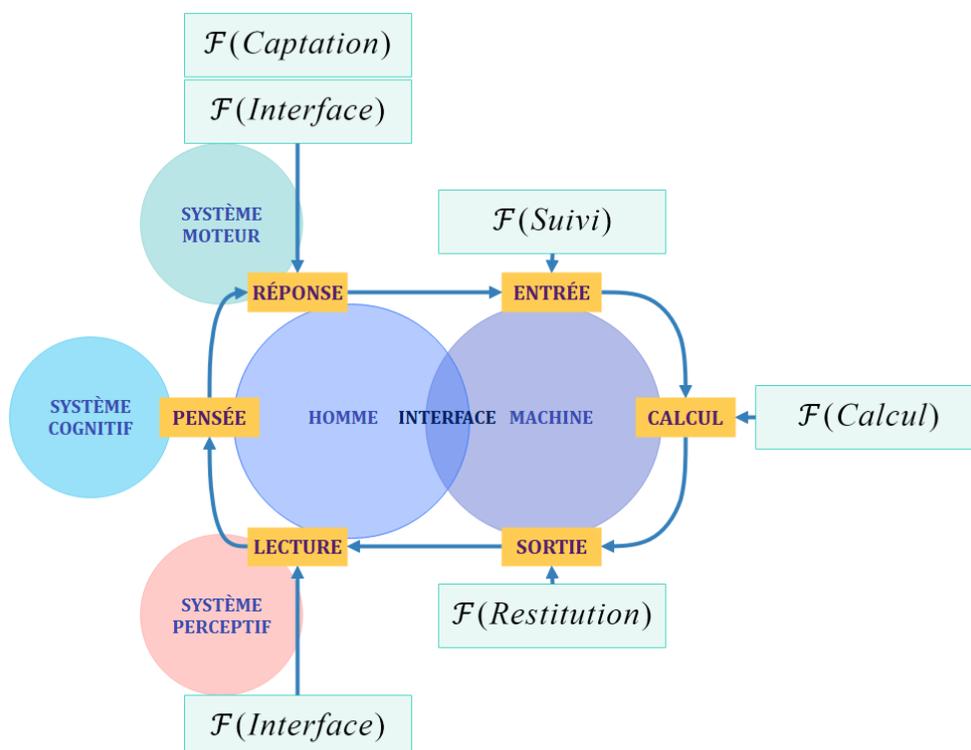


Figure 63: Le cycle d'interaction homme-machine mise en perspective avec notre classification des technologies de RA. Diagramme repris de (Nogier and Leclerc, 2016) et adapté.

La réponse de l'humain à la machine permettrait ainsi d'être saisie par les capteurs dont sont dotés les technologies de RA (accéléromètre, gyroscope, magnétomètre, etc.) et par les diverses opérations effectuées dans l'interface (sélection/désélection d'élément(s) virtuel(s), connexion/déconnexion de l'application à un serveur, etc.). Ces deux briques technologiques mises en exergue dans la « réponse » de l'Homme à la machine sont les fonctions Captation et Interface (reconnaissance).

Par la suite, en « entrée » du logiciel, la fonction Suivi qui permet de traquer les mouvements effectués par l'individu dans le champ d'interaction avec la technologie de RA, est compilée avec les données provenant de la « réponse » de l'homme à la machine grâce à la fonction Calcul de cette dernière. Celle-ci prodigue un retour en « sortie », c'est la fonction Restitution de la machine qui est alors sollicitée. Cette restitution sera par la suite perçue par les sens de l'individu grâce à sa « lecture » du retour d'information (visuel, auditif, haptique, etc.) fourni par l'interface (retour d'information) du dispositif de RA. C'est la fonction Interface qui est dédiée à cette tâche.

III.2.2 Modélisation des activités humaines

La complétion des objectifs d'une tâche au sein d'une interface est le résultat de la décomposition de cette même tâche en actions élémentaires, décomposition qui dépend de l'individu et de son usage. La modélisation de l'accomplissement de la tâche doit être réalisée afin d'interroger le type, la nature et le nombre d'interacteurs qui seront utilisés dans le contexte d'utilisation de l'interface.

Cette modélisation viendra donc en supplément des modèles cognitifs énoncés précédemment et sera mise en perspective de la classification des interacteurs effectuée par Bowman et Hodges en 2001 et exposée en figure 53 de ce même chapitre.

III.2.2.1 La théorie de l'action

Cette théorie de l'action a été élaborée par Norman et Draper (**Norman and Draper, 1986**) en 1986. La base théorique sur laquelle s'appuient les auteurs est que toute action sur un système est un processus itératif d'exécution et d'évaluation de cette exécution par rapport au but recherché (fig.64).

Ce processus itératif comprend sept étapes selon Norman et Draper :

1. L'établissement d'un but en réponse à une demande. Pour les auteurs, un but est une représentation mentale de l'objectif à atteindre ;
2. La formulation d'une intention. Il s'agit du processus décisionnel d'agir pour planifier les actions nécessaires à l'atteinte du but ;
3. L'ordonnancement d'une suite d'actions dont leur exécution permettra d'atteindre ce but ;
4. L'exécution proprement dite de l'humain sur le système via ses fonctions motrices nécessaires pour atteindre le but fixé ;
5. La constatation des changements opérés au sein du système ;
6. L'interprétation du nouvel état du système après constatation des changements ;
7. L'évaluation du nouvel état du système par rapport aux intentions premières et au but fixé. Si le but n'est pas atteint, le processus redémarre.

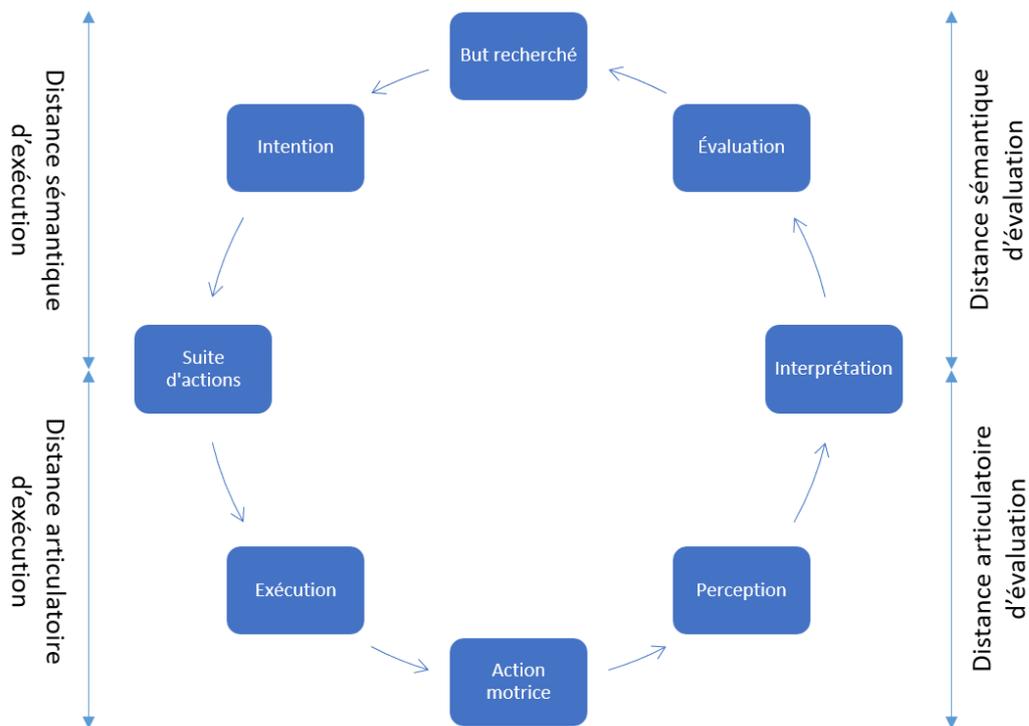


Figure 64: Cycle d'exécution/évaluation de Norman & Draper. D'après (Nogier and Leclerc, 2016).

La dimension d'exécution de l'humain dans le système est la séquence des intentions, de la suite d'actions et de l'exécution des actions sur le système. La dimension d'évaluation est la séquence successive de la perception, de l'interprétation et de l'évaluation des changements effectués au sein du système par rapport au but recherché.

Selon Nogier et Leclerc (Nogier and Leclerc, 2016), le processus est la composition de deux couches, une première sémantique, une seconde articulatoire. Les distances de ces couches sont fonction de la complexité de mise en œuvre des étapes de la théorie de l'action au sein ce processus dans l'interface. Ainsi, pour les auteurs : « la distance sémantique symbolise la distance entre le but visé par l'utilisateur et les actions/objets de l'interface. Elle témoigne de la complexité de compréhension du système ». Les auteurs considèrent donc le « coût » cognitif associé à la compréhension du fonctionnement du système, tant dans l'ordonnement des tâches à mettre en œuvre dans l'interface que dans le retour effectué par le système pour permettre à l'individu de vérifier si l'état est tel qu'il le souhaite dans son intention première.

Toujours selon Nogier et Leclerc, « la distance articulatoire figure la distance entre l'action et sa représentation physique. Elle atteste de la complexité d'utilisation du système ». Ici, c'est l'efficacité du système dans sa manipulation pour exécuter les commandes et percevoir le résultat qui est mesurée via un « coût » cognitif et moteur à acquitter par l'individu pour utiliser l'interface.

Finalement, la réduction de ces distances sémantiques et articulatoires sont primordiales pour un développeur d'applications afin que celles-ci puissent être utilisables pour les individus.

III.2.2.2 Modélisation des activités par décomposition des tâches

Leplat (**Leplat, 1997**) considère l'activité comme « un objet complexe qui s'inscrit dans un réseau de conditions qui la modèlent et qu'elle contribue inversement à modeler ». Robinson (**Robinson, 2001**) ajoute que cette activité possède une difficulté, liée aux facultés cognitives de l'individu, et une complexité associée aux exigences cognitives de la tâche ainsi que de ses conditions d'application.

Pour ces deux auteurs, comme pour Nogier et Leclerc, la tâche et l'activité sont deux entités distinctes qu'il est nécessaire de définir. La tâche prévue ou « tâche prescrite » défini dans le langage des spécialistes en ergonomie de l'activité *ce qui doit être fait*, tandis que l'activité est une « tâche effective », faite sur le terrain et qui possède un écart vis-à-vis de ce qui aurait dû être fait. L'activité représente *ce qui est fait* dans la situation en regard des critères d'organisation de la tâche prescrite, mais aussi de sa complexité intrinsèque et de sa difficulté résultant des caractéristiques de la personne qui effectue cette tâche, tant du point de vue cognitif, que de sa motivation et de sa confiance à la complétion de la tâche.

Nogier et Leclerc résumant l'intérêt de cette distinction entre tâche et activité : « *En effet, lors de la conception d'un logiciel, on part d'informations sur la tâche (le cahier des charges) et non sur l'activité. Or, c'est dans un contexte d'activité que sera utilisé le logiciel. C'est pourquoi il est important de mettre en situation l'utilisateur et de l'observer afin de comprendre son activité* ». Cet élément de discussion fait écho avec les techniques de conception que nous évoquons dans la section 1 de ce même chapitre : nous partons du général pour finir la conception par le plus spécifique : les interacteurs et leur(s) métaphore(s).

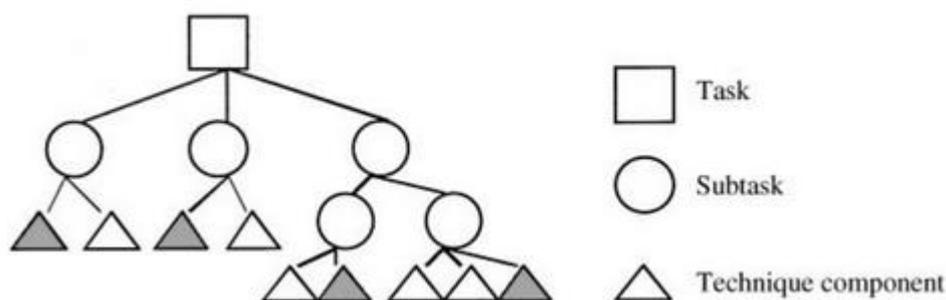


Figure 65: Décomposition des tâches en sous-tâches pour définir les techniques d'interaction nécessaires dans le cadre du développement d'une interface homme-machine. Extrait de (**Bowman and Hodges, 1999**).

Les stratégies de mises en œuvre des individus étant liées à leurs capacités cognitives, motivationnelles et émotionnelles, il convient de définir précisément quand et comment les interacteurs apparaissent dans le système de restitution de l'interface afin de ne pas surcharger cognitivement l'individu par des éléments superflus. De même, celui-ci comparera l'utilisation du système, la tâche système, à l'aune de sa tâche métier, ses objectifs à remplir. Or, selon Nogier et Leclerc, si ceux-ci sont en défaveur du système, l'individu le rejettera.

Bowman et Hodges ont déjà pris en compte cet écueil possible quand, faisant la proposition d'une classification des métaphores d'interaction en 1999 (**Bowman and Hodges, 1999**), ils conseillaient de décomposer chaque tâche en sous-tâche et ainsi de suite jusqu'à obtenir la métaphore d'interaction qui s'imposait (fig.65). Les auteurs spécifiaient par ailleurs que : « *la figure [65] montre une taxonomie généralisée. De telles taxonomies décomposent les tâches en sous-tâches séparables, chacune d'entre elles*

représentant une décision qui doit être prise par le concepteur d'une technique [d'interaction]. Certaines de ces sous-tâches sont directement liées à la tâche elle-même, tandis que d'autres peuvent n'être importantes que comme extensions de la métaphore sur laquelle la technique est basée. En ce sens, une taxonomie est le produit d'une analyse minutieuse de la tâche. Une fois que la tâche a été décomposée à un niveau suffisamment fin, la taxonomie est complétée par l'énumération des méthodes possibles (composants techniques) pour accomplir chacune des sous-tâches de niveau inférieur. Une technique d'interaction est constituée d'un composant technique de chacune des sous-tâches de niveau inférieur, comme l'ensemble des composants ombragés de la figure 26 »¹¹.

Les interfaces et leurs interacteurs nécessitent une prise en main certaine dans le cadre d'objectifs industriels à remplir à l'aide de systèmes interactifs. Les développeurs n'ayant pas toujours pris en considération les spécificités des utilisateurs finaux, les difficultés des tâches à réaliser avec le système interactif, l'organisation de la production, etc. Intéressons-nous dorénavant aux interfaces dédiées à l'apprentissage dans des environnements industriels où l'adjonction de systèmes immersifs et interactifs pourraient s'avérer judicieux.

III.2.3 Les interfaces d'apprentissage aux tâches

III.2.3.1 Environnements d'apprentissage intelligents

Koper (**Koper, 2014**) définit un Smart Learning Environment (SLE) comme « *des environnements physiques enrichis de dispositifs numériques, contextuels et adaptatifs, afin de promouvoir un apprentissage meilleur et plus rapide* »¹². Koper définit précisément ce qu'il entend par Learning Environment. Il doit permettre la stimulation de l'apprentissage au travers de l'ajout de matériaux pédagogiques, de tâches, de tests, ainsi que de feedbacks et d'un support : « *La plupart des environnements d'apprentissage sont délibérément aménagés ou adaptés pour stimuler l'apprentissage vers certains objectifs d'apprentissage, par exemple en ajoutant du matériel d'apprentissage, des tâches, des tests, un retour d'information et un soutien* »¹³. L'auteur définit ainsi cinq cas d'environnements d'apprentissage et donne sa définition de ceux-ci :

1. « **The Zero Case** » : Pas de stimuli physique ou numérique venant s'ajouter à l'environnement dans lequel la personne évolue. Il s'agit de représentations cognitives indépendantes du monde réel : Il s'agit de perceptions mentales telles que le rêve, la pensée ou encore la visualisation de quelque chose basée sur la mémoire ou la créativité de la personne ;
2. « **The Digital Case** » : Environnement de travail où les stimuli sont tous digitaux. L'auteur mentionne un monde de réalité virtuelle, un *serious game* ou une classe virtuelle. Il n'existe pas de stimuli provenant du monde réel dans ce cas d'étude. Nous associons ce cas à la formation en réalité virtuelle qui se répand dans les industries de nos jours ;

¹¹ "Figure 26 shows a generalized taxonomy. Such taxonomies decompose the tasks into separable subtasks, each of which represents a decision that must be made by the designer of a technique. Some of these subtasks are related directly to the task itself, while others may only be important as extensions of the metaphor on which the technique is based. In this sense, a taxonomy is the product of a careful task analysis. Once the task has been broken up to a sufficiently fine-grained level, the taxonomy is completed by listing possible methods (technique components) for accomplishing each of the lowest-level subtasks. An interaction technique is made up of one technique component from each of the lowest-level subtasks, such as the set of shaded components in Figure 26".

¹² "as physical environments that are enriched with digital, context-aware and adaptive devices, to promote better and faster learning".

¹³ "Most learning environments are deliberately arranged or adapted to stimulate learning towards some learning objectives, e.g. by adding learning materials, tasks, tests, feedback and support".

3. « The Embedded Case » : L'environnement physique fourni des stimuli pertinents que viennent compléter les appareils numériques afin d'enrichir la perception cognitive de l'opérateur. Il y a une partie des stimuli provenant ainsi de l'environnement physique de l'opérateur et une partie provenant des informations contextuelles affichées (si l'on utilise la RA visuelle et non pas un appareil haptique ou auditif) par le dispositif ;
4. « The Side-by-Side Case » : Ce cas énonce le cas où des informations, du support ou des tests et des retours d'information, tous virtuels, sont présents dans l'environnement physique de l'opérateur mais où ceux-ci ne sont pas en interaction avec le monde réel. Ils n'existent que parce qu'une personne les a placés là et ils existent indépendamment (sans interaction avec...) du monde réel. Il y a une fragmentation des éléments virtuels et du monde réel.

Koper ajoute que les dispositifs numériques sont ignorants du monde réel, ce qui nous laisse à penser qu'un cas comme celui-ci pourrait survenir si nous supprimions les systèmes de capteurs ainsi que de suivi des appareils de RA. Ces derniers deviendraient donc inconscients et n'interagiraient plus avec le monde réel ;

5. « The Classical Case » : L'environnement fourni des stimuli pertinents qui ne relèvent pas de l'interaction avec des appareils numériques. L'auteur nomme ce cas « *the old school situation* ». L'apprentissage relève seulement des stimuli de l'environnement physique.

Koper note à la fin de son intervention que ces stimuli peuvent être sélectionnés avec l'intérêt que leur porte l'individu. Ces stimuli doivent donc être potentiellement ajoutés ou supprimés à la guise de l'opérateur et en fonction de son contexte : « *Notez que dans chacune des représentations mentionnées dans les cas, des personnes différentes ont des représentations différentes parce qu'elles sont sélectives dans leur attention, qu'elles représentent les stimuli dans le contexte de leurs intérêts et de leurs connaissances préalables, et qu'elles ajoutent et suppriment des informations pour s'adapter à une vision qui leur convient. Le comportement et l'apprentissage sont le résultat de ces représentations individuelles différentes et non le résultat direct des stimuli fournis* »¹⁴.

III.2.3.2 Caractérisation d'un SLE

Koper considère que seul le cas trois, « *the Embedded Case* » peut être considéré comme un SLE en ceci qu'il apporte les quatre caractéristiques obligatoires suivantes :

1. Au moins un dispositif numérique ajouté au poste de travail de l'individu ;
2. L'appareil numérique doit être conscient de l'environnement dans lequel évolue l'individu, cela du point de vue des localisations, du contexte et de la culture ;
3. De ces trois types de conscience (localisation, contexte et culture), l'appareil doit apporter des informations (augmentées), des analyses, une collaboration à distance des retours utilisateurs et des actions anticipatrices (*feedforwards*) ;
4. Procurer un suivi des progrès dans l'apprentissage de l'opérateur et fournir les informations appropriées aux parties prenantes.

La collaboration entre un individu et le monde réel passe par capacités perceptrices (données d'entrée) et la mise en œuvre des réponses musculaires résultantes (données

¹⁴ "Note that in any of the representations mentioned in the cases, different people have different representations because they are selective in attention, represent stimuli in the context of interests and pre-knowledge, and add and delete information to fit a view which is comfortable to them. Behavior and learning are the result of these individually different representations and not directly the result of the stimuli provided"

de sortie). Koper considère qu'une interface permettant le dialogue entre une machine et un individu doit permettre de stimuler les sens de la personne et lui permettre d'adapter son comportement en conséquence. L'auteur parle de mécanismes d'intervention qui permettent la stimulation des sens et oriente le comportement et l'état physique de la personne envers la machine et son environnement. Pour ce faire, le chercheur fait émerger un intermédiaire, l'interface d'apprentissage humain (*Human Learning Interface* ou HLI). Cette HLI autorise quatre types d'interactions possibles avec la personne :

1. Questionner [l'utilisateur de l'appareil]. Koper ajoute : « *Poser des questions fait appel à toutes sortes de processus cognitifs. Elles font appel à l'amorçage (les questions offrent un contexte), à la récupération d'informations, à la pensée supérieure et aux effets de test* »¹⁵.
2. Donner une tâche à accomplir [à l'opérateur]. Ces tâches peuvent être simples ou complexes. Ces dernières peuvent être une instruction à lire, une ligne vocale d'explication, ou un retour haptique quelconque.
3. Fournir quelque chose [à la personne]. Koper détaille : « *la fourniture d'informations, un événement qui se produit dans l'environnement physique, certains instruments ou d'autres ressources qui sont donnés à l'apprenant. La fourniture d'événements, l'accès aux personnes et aux outils font partie de l'aménagement de l'environnement d'apprentissage. Un environnement d'apprentissage doit disposer des outils, des informations et des personnes appropriés afin de faciliter certains processus d'apprentissage* »¹⁶.
4. Conditionnement de l'environnement [de l'opérateur]. Selon Koper, il faut : « *fournir un retour positif et négatif, fournir des incitations, créer des contingences ou fournir des stimuli associatifs. Dans la plupart des environnements d'apprentissage, ces informations sont fournies par un enseignant qui félicite les élèves pour leur comportement, leur attribue des notes ou leur fournit d'autres formes d'incitations. Dans les environnements d'apprentissage numériques, vous voyez également des lots, des points et des classements qui conditionnent l'environnement* »¹⁷.

En ce qui concerne le conditionnement de l'environnement (point n°4), l'ajout d'éléments de *ranking* et de points ainsi que des récompenses sont largement utilisés dans les applications vidéo ludiques dans les smartphones de nos jours, on appelle cela ludification (*gamification*). L'environnement ainsi généré dans l'interface est donc incitatif en ce sens qu'il interpelle l'utilisateur et augmente l'acceptabilité de l'application en se fondant sur la prédisposition humaine pour le jeu.

III.2.3.3 Interfaces d'apprentissage humain

Koper (**Koper, 2014**) considère une HLI (Human Learning Interface) comme un ensemble de mécanismes d'interaction que l'individu expose au monde extérieur par l'intermédiaire de cette interface et qui peuvent être utilisés pour contrôler, stimuler et faciliter les processus d'apprentissage.

¹⁵ "Asking questions invokes all kinds of cognitive processes. It invokes priming (questions offer a context), retrieval of information, it invokes higher order thinking and testing effects"

¹⁶ "The provisioning of information, an event that occurs in the physical environment, some instruments or other resources that are given to the learner. Provisioning of events, access to persons and tools are part of the arrangement of the learning environment. A learning environment should have the appropriate tools, information and people available in order to facilitate certain learning processes"

¹⁷ "[...] provide positive and negative feedback, provide incentives, create contingencies, or provide associative stimuli. In most learning environments this is provided by a teacher who praises students for behaviour, provide grades, or provide some other forms of incentives. In digital learning environments you also see batches, points and rankings to condition the environment"

Une Interface d'Apprentissage Humain ou HLI peut permettre l'interaction entre des individus, des appareils numériques (machines, etc...) et des objets/ressources avec, pour objectif, l'accroissement par l'individu (appelé *Learner* par Koper dans sa description du concept) de ses connaissances et/ou de ses compétences.

Dans un SLE (environnement d'apprentissage humain), l'individu utilise son système d'acquisition sensoriel pour percevoir son environnement, puis, via des processus cognitifs, les retranscrit en comportements moteur. Ceux-ci sont alors interprétés par l'interface HLI au travers d'*observations* générées grâce aux fonctions suivi et captation des technologies de RA, qui sont ensuite corrélées aux *objectifs* de la tâche prescrite pour permettre à la HLI d'effectuer ce que Koper nomme des *interventions*. Ces interventions se matérialisent par une restitution augmentée qui seront ensuite perçues par l'utilisateur, etc. La figure 66 explicite notre propos via un schéma réalisé par Koper.

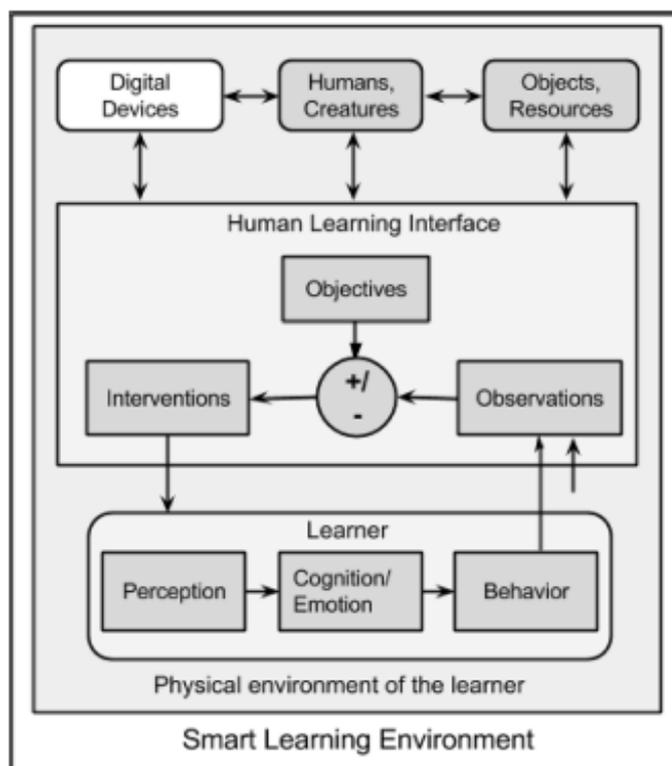


Figure 66: Aperçu général du fonctionnement d'une HLI. Extrait de (Koper, 2014).

Les *observations* sont la capacité par la HLI de détecter et de comprendre les changements opérés dans l'environnement du dispositif interactif par l'utilisateur. Koper dit que pour permettre l'obtention d'un environnement adaptatif, qui soit « *context-aware* », il est nécessaire que les comportements des interventions soient basés sur la spécification des observations qui sont faites par le système : « *Les observations déterminent le degré d'adaptation d'un SLE. Pour chacune des interventions, les comportements de sortie attendus doivent être spécifiés afin de déterminer ce qui doit être observé* »¹⁸.

Il nous semble alors profitable de déterminer des scénarios lors de la conception d'un poste de travail afin de balayer les possibilités des *observations/interventions* qui seront susceptible d'émerger lors de l'utilisation de la technologie immersive et interactive. Les objectifs sont la plupart du temps énoncés et contrôlés. Koper ajoute que dans certains cas (il ne précise cependant quels sont ces cas), de simples *interventions* peuvent suffire.

¹⁸ "The observations determine how adaptive an SLE can be. For each of the interventions expected output behaviors should be specified to determine what should be observed".

Selon nous, il semble que Koper laisse la définition d'objectifs à la décision des constructeurs de la HLI.

Pour Koper, il existe 5 types de HLI, des **Core HLIs**, au nombre de trois, et deux types de **méta-HLIs**. L'imbrication de ces interfaces d'apprentissage sont visibles à la figure 67. Les cinq HLIs sont :

1. **HLI d'identification** : Apprentissage de nouvelles situations et de nouveaux événements, et savoir comment agir et réagir en conséquence ;
2. **HLI de socialisation** : Apprendre à représenter les normes sociales, les valeurs et les idéologies et adapter son comportement ;
3. **HLI de création** : Apprentissage de nouvelles séquences de comportement afin de créer quelque chose ;
4. **HLI de pratique** : Apprendre à représenter les connaissances et les actions plus rapidement et mieux, y compris la représentation des objectifs de performance ou des incitations futures pour l'un des comportements mentionnés précédemment ;
5. **HLI de réflexion** : Apprendre à créer des représentations de représentations et à modifier les représentations et les comportements initiaux.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous nous concentrerons sur les détails inhérents au HLIs *Identification*, pour l'intérêt qu'elle ont via l'apprentissage des tâches prescrites dans un contexte industriel donné, et aux méta-HLIs *Practice*, et *Reflection*, en ce sens qu'elles permettent la promotion de l'opérateur 4.0 depuis le stade de formation au poste, dans un cadre de décorrélation de la production réelle (*Identification*), jusqu'à son travail effectif sur la chaîne de production (*Practice*), enfin de sa capacité à faire évoluer le poste de travail afin d'obtenir de meilleures performance et/ou de meilleures conditions de travail (*Reflection*).

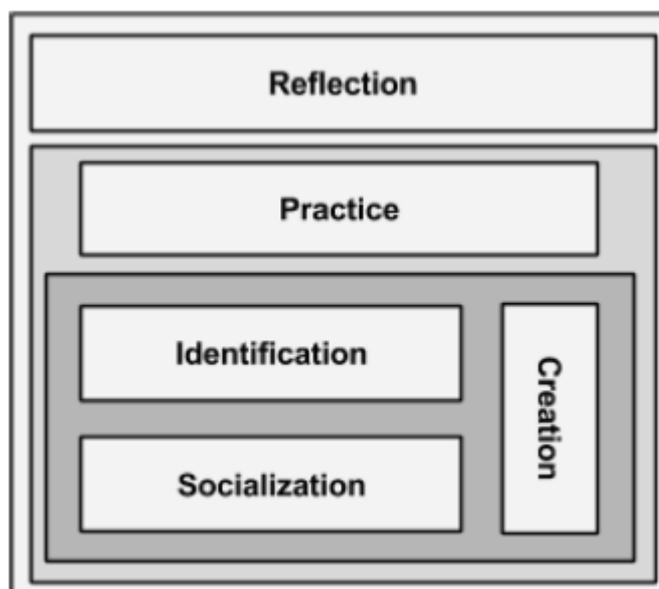


Figure 67: Imbrication des HLIs selon Koper(Koper, 2014).

III.2.3.4 Interface d'apprentissage humain d'identification

Rob Koper définit les interfaces d'identification comme suit : « *L'identification est le mécanisme d'apprentissage qui est nécessaire lorsque vous rencontrez une nouvelle*

situation et vous apprenez par l'expérience et l'action dans la situation »¹⁹. L'auteur définit par ailleurs une liste d'interventions qui peuvent être utilisées :

- Fournir une situation qui est nouvelle pour l'utilisateur. Celle-ci doit inclure des événements et des éventualités qui vont challenger la personne pour qu'elle réagisse correctement ;
- Donner la tâche d'observer et d'explorer la situation et ses éléments afférents incluant les possibilités d'agir et d'expérimenter ;
- Donner la tâche d'identifier et catégoriser les différences et les similitudes afin que les composants soient labellisés par des symboles et/ou des noms. Poser des questions à propos et fournir les retours d'informations appropriés ;
- Fournir des informations contextuelles à propos de la situation, ses constituants et son histoire, pour apprendre à connaître le processus, ainsi que les éléments associés. Poser des questions à propos de ces informations contextuelles et demander aux personnes de créer elles-mêmes leur contexte et de définir la situation ;
- Donner la tâche de faire des activités dans l'environnement de travail ;
- Fournir des incitations quand les conditions sont rencontrées.
- Donner la tâche de résoudre des problèmes et poser la question « *what-if* ».

L'auteur de l'article fournit des informations complémentaires à ce type de HLI. Tout d'abord, pour que cette dernière soit capable d'avoir le comportement adéquat en fonction de la situation nouvelle survenue, il est nécessaire d'identifier les situations qui pourraient survenir. Cela implique d'avoir déjà prospecté les scénarios d'utilisation de l'IHM dans le contexte d'utilisation de la technologie sur le poste de travail. Ensuite, concernant l'aide prescrite, Koper insiste sur le fait que cette aide doit être graduée par une diminution de l'aide au fur et à mesure afin de rendre l'opérateur de plus en plus indépendant. Le parallèle avec la première doctrine du capacitant est manifeste puisque celle-ci convoque l'idée d'apprentissage et du maintien de celui-ci au cours du temps.

III.2.3.5 Interface d'apprentissage humain de pratique

Koper considère l'interface de pratique comme une HLI de niveau supérieur à celle d'identification. Par conséquent, cette interface englobe les trois autres que sont les *Core* HLIs d'identification, de socialisation et de création (voir fig.67).

Pour l'auteur, cette interface nécessite la pratique répétée des compétences apprises dans les interfaces de niveau inférieur pour augmenter la cadence et la performance. Pour lui, la pratique peut être exécutée dans la réalité mais aussi dans le jeu. On revient au concept de ludification propre à l'intervention n°4 du paragraphe précédent, qui permet de conditionner l'environnement de l'utilisateur afin de susciter une acceptation plus importante. Koper considère cette interface comme étant une *méta-HLI* qui peut être intégrée dans les trois interfaces dites *Core HLIs*.

Quelques points pratiques importants à noter selon l'auteur : a) il doit y avoir un environnement approprié incluant les outils et les pairs dans l'activité si ceux-ci existent, b) il faut que l'individu puisse effectuer les tâches de manière répétitive afin d'intégrer le processus, c) la mesure de performance et les standards qui seront appliqués dans le futur doivent être mis en place, d) le dispositif interactif doit fournir les retours d'information

¹⁹ "Identification is the learning mechanism that is needed when you encounter a new situation and you learn through experience and acting in the situation"

sur les accomplissements réalisés, e) des incitations doivent être mises en place (graphes d'augmentation de la performance, courbe d'apprentissage, ludification).

III.2.3.6 Interface d'apprentissage humain de réflexion

L'interface de réflexion stimule : la réflexion, le recadrage du problème et de la solution, l'évaluation des résultats, la prise de décision, l'élaboration de stratégies, l'autorégulation et l'apprentissage non monotone et profond. Cela implique de passer outre l'expérience antérieure, d'essayer de nouvelles idées, d'avoir une vision créative, de faire évoluer les capacités cognitives de l'individu en tirant des leçons des erreurs, et de convertir les représentations mentales erronées en d'autres compatibles.

La réflexion peut être stimulée de la manière suivante : a) stimuler les personnes à prendre le temps d'envisager différentes options avant d'agir, b) stimuler les personnes dans la pensée créative, en proposant de nouvelles idées et solutions, c) offrir la possibilité de revoir et d'analyser leurs actions et leurs effets et de réfléchir aux améliorations possibles, d) offrir des possibilités de se tester en posant des questions, d'évaluer les objectifs, l'environnement et le comportement, e) stimuler les processus de prise de décision, et faciliter le développement de stratégies.

L'interface de réflexion est également une *méta-HLI* pour les quatre interfaces mentionnées précédemment. Cela signifie qu'un environnement d'apprentissage intelligent, axé sur l'identification, devrait également comprendre des dispositions pour la pratique et la réflexion afin de stimuler un apprentissage plus pérenne et évolutif qui confinerait à terme, à des prédispositions, pour l'individu, à améliorer continuellement le dispositif et ses interactions avec celui-ci ainsi qu'avec son poste de travail et ses tâches prescrites.

L'évaluation de ce type de conceptualisation des interfaces doit dorénavant être faite dans le but de vérifier si les recommandations de Koper s'avèrent être pertinentes dans le cadre de l'utilisation d'interfaces d'apprentissage à des fins industrielles d'une part. D'autre part, la capitalisation des connaissances et leur propagation au sein de l'organisation doit être posée et clarifiée afin de saisir les moyens mis à disposition des industriels pour faire évoluer leur appareil de production avec l'aide des opérateurs expérimentés qui pourraient, par le truchement des HLI de réflexion, contribuer à l'amélioration continue des lignes de production et des postes de travail.

Ces deux aspects, d'évaluation des concepts d'interfaces d'apprentissage, et de capitalisation des connaissances des individus sont abordés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV : L'apprentissage humain dans l'entreprise

Section 1 Apprentissage humain en contexte industriel

IV.1.1 Appropriation des concepts de SLE et de HLI à des fins d'exploitation industrielle

Le souhait d'environnement capacitant conduisant à envisager les capacités d'évaluation de l'opérateur et donc d'apprentissage ont conduit Aehnelt & Urban (Aehnelt and Urban, 2015) et Aehnelt & Wegner (Aehnelt and Wegner, 2015) à s'approprier les concepts d'environnements d'apprentissage intelligents et d'interfaces d'apprentissage intelligentes pour les intégrer à un environnement de travail.

Les moyens mis en œuvre dans le cadre des deux publications citées consistent en un chariot sur roulettes dans lequel est installé un ordinateur possédant une interface intelligente (fig.68), basée sur les travaux de Koper soit donc une interface d'apprentissage intelligente. En plus de ce dispositif interactif, la desserte roulante contient l'intégralité des moyens d'assemblage nécessaire à l'opérateur pour atteindre les objectifs visés par le management sur la ligne de production. Les auteurs ne mentionnent pas le domaine industriel dans lequel évoluent les opérateurs mais parlent d'un poste d'assemblage de composants électroniques.

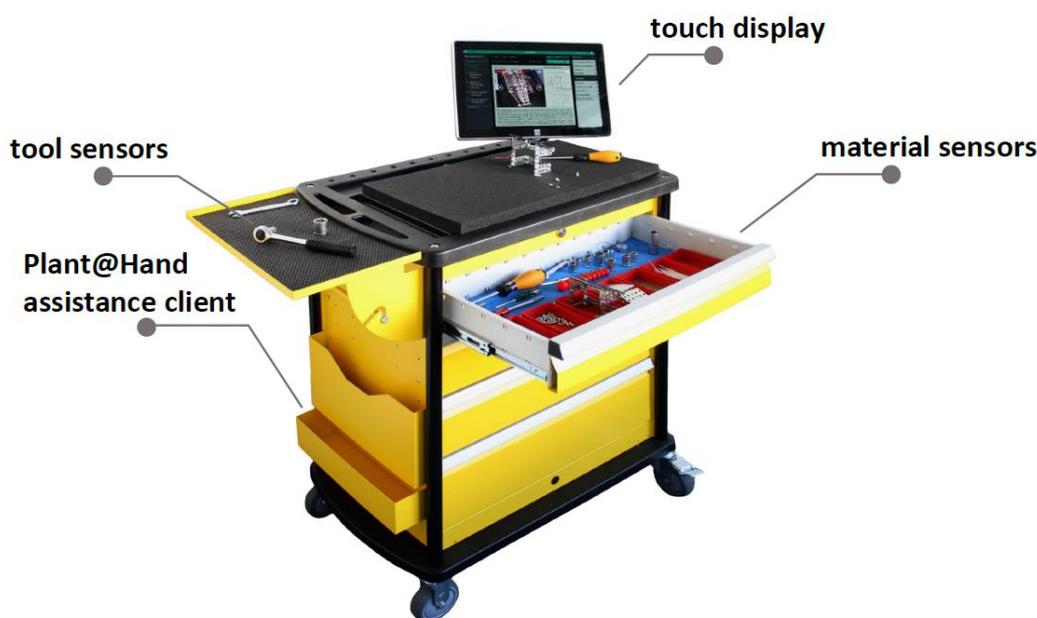


Figure 68: Le dispositif interactif décrit par Aehnelt et alii. Celui-ci consiste en un chariot sur lequel est disponible une interface d'apprentissage. D'après (Aehnelt and Wegner, 2015).

L'objectif de l'environnement décrit est de faire face à des situations nouvelles où il existe un décalage entre les connaissances de l'individu et les connaissances requises pour la complétion de la tâche. Notons le parallèle entre l'interface d'identification de Koper (Koper, 2014) où l'opérateur, face à une situation inconnue, est aidé par celle-ci, pour atteindre les performances souhaitées et le cas d'étude posé par les chercheurs. Cette interface, les auteurs l'appellent *Cognitive Architecture*. Nous verrons en détail les composants de celle-ci plus loin. La situation d'identification est qualifiée par les auteurs de *context-aware information assistance*, quant à la chaîne de production, ils l'insèrent dans le concept plus global d'industrie 4.0. Cette situation d'identification, nous la relierons à de la réalité augmentée.

Pour (Aehnelt and Wegner, 2015), l'apprentissage et la créativité sont des clés pour résoudre les problématiques inhérentes aux situations nouvelles : « *Bien que l'aide à*

l'information traditionnelle fournisse au travailleur des informations liées à la tâche, elle le laisse seul face à des situations imprévues et non planifiées. Dans ce cas, le travailleur doit compter sur ses propres capacités pour y faire face correctement. L'apprentissage est sa clé pour résoudre des situations et des tâches même incertaines et complexes »²⁰.

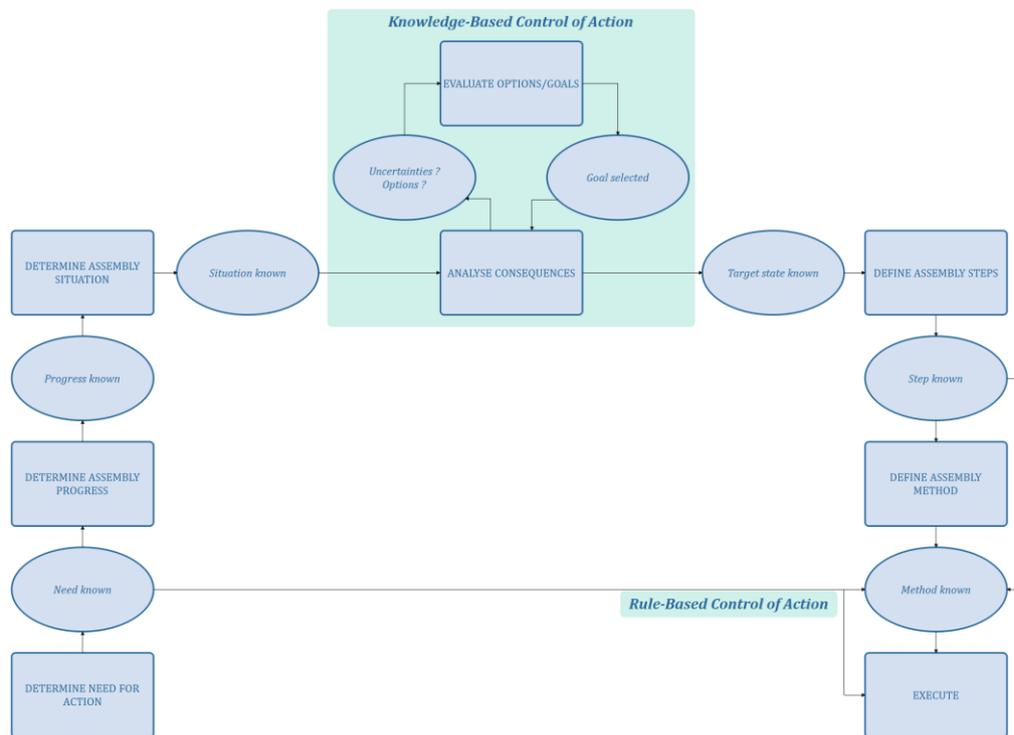


Figure 69: Une situation de travail pour l'opérateur nommé Work-related control of action. Extrait de (Aehnel and Wegner, 2015).

Le champ d'action d'un individu sur une séquence de tâches est basé sur un processus continu d'observations et d'analyses durant la progression du travail, nommé par les auteurs *Work-related Control of Action*. Ce dernier se base régulièrement sur son expérience et ses connaissances pour anticiper et résoudre les problèmes qui pourraient survenir mais aussi pour planifier les actions suivantes. Dans le cas où une action inconnue surviendrait, l'opérateur doit agir différemment. Il doit se baser sur un système lui permettant de faire jonction avec ce que les auteurs des articles (Aehnel and Urban, 2015) et (Aehnel and Wegner, 2015) nomment *l'Expert Knowledge* via une base de données connectée à l'interface du système, c'est cela que les auteurs appellent la *Cognitive Architecture*. La figure 69 illustre nos propos.

L'interface interpelle l'individu par le jeu de questionnements et d'accompagnements lors de l'analyse de la nouvelle situation permettant à celui-ci de planifier, exécuter et valider afin de pouvoir apprendre et gagner en compétences tout en gardant un contrôle maximum de l'action, ce que les auteurs soulignent au travers de ces propos (Aehnel and Wegner, 2015) : « Comme le montre l'illustration [fig.69], le contrôle de l'action liée au travail comprend un degré élevé de prise de décision. La consolidation des connaissances issues de l'apprentissage ou de ses propres expériences conduit à un comportement conforme aux règles et à la planification d'actions dans des situations connues. Cependant, dans des situations incertaines, le travailleur doit évaluer différentes opportunités et

²⁰ "Although, traditional information assistance provides the worker with task-related information, it leaves him alone in unforeseen and unplanned situations. Here, the worker has to rely on his own abilities to deal with it correctly. Learning is his key to solve even uncertain and complex situations and tasks"

objectifs d'action en utilisant ses connaissances sur des situations similaires pour identifier un plan d'action approprié »²¹.

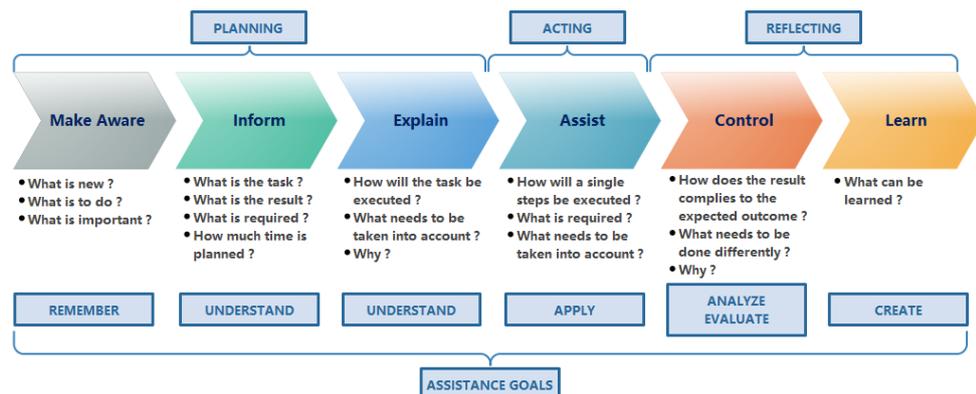


Figure 70: Assistance dans une situation nouvelle par l'IHM. Extrait de (Aehnel and Urban, 2015).

Nous pouvons observer en figure 70 que la partie réflexion résultante de l'après-exécution d'une tâche dans une situation nouvelle fait intervenir des questionnements que l'on pourrait rapprocher de la *méta-HLI* de réflexion : Les objectifs sont-ils atteints ? comment améliorer le processus ? pourquoi ? etc.... Il semble pertinent que ce type d'IHM possède ce genre de questionnements portés à l'individu, comme le souligne Koper (Koper, 2014), fait de ce genre d'interventions, l'une des bases de son SLE.

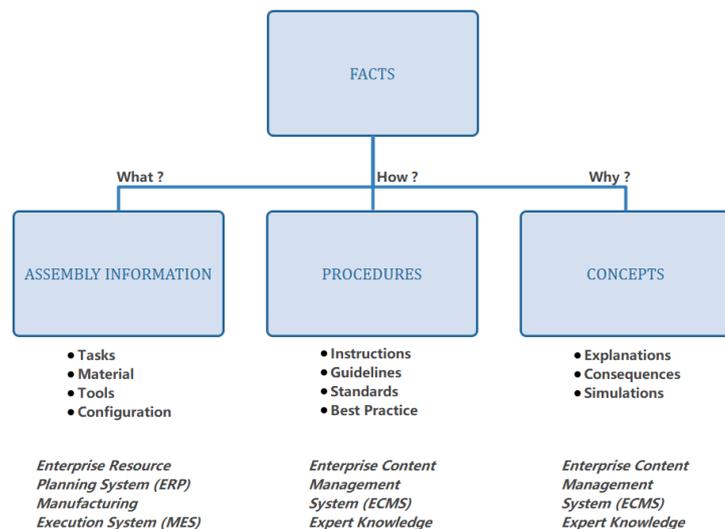


Figure 71: Constitution d'une situation décomposée via le triptyque des faits, procédures et concepts. Extrait de (Aehnel and Urban, 2015).

Dans le cas de situations connues ou inconnues, l'opérateur rationnel procède de la façon suivante : il vérifie les faits, contrôle les procédures, et utilisent des concepts pour

²¹ "As illustrated work-related control of action includes a high degree of decision making. Consolidated knowledge from learning or own experiences leads to rule-like behavior and action planning in known situations. However, in uncertain situations the worker needs to evaluate different opportunities and action goals using his knowledge on similar situations to identify a suitable action plan"

contextualiser et anticiper les conséquences de ses actions sur un ensemble aux propriétés modifiées par son(s) action(s). Dans (Aehnelt and Urban, 2015), les auteurs exposent ce triptyque dans le cadre d'un assemblage à exécuter. Ils définissent trois questions résultantes de ces faits, procédures et concepts et lient ceux-ci aux systèmes numériques de l'entreprise : ERP, MES et même l'*Expert Knowledge*. Le triptyque élaboré par les chercheurs est disponible à la lecture en figure 71.

Pour finir, et en se basant sur les axiomes définis précédemment, les auteurs ont imaginé une interface entre l'homme et la machine nommé *Cognitive Architecture* qui a pour mission de seconder l'individu dans ses tâches et de lui permettre d'apprendre tout en travaillant (d'où l'expression « *Learn but Work!* » dans le titre de l'article de Aehnelt et Wegner (Aehnelt and Wegner, 2015) : « *Learn but Work! Towards Self-Directed Learning at Mobile Assembly Workplaces* »).

Cette architecture se compose de 5 éléments, qui sont en liaison avec les systèmes de gestion de l'entreprise (ERP, MES, PLM, etc...) et qui analyse en continue les tâches effectuées par l'opérateur afin de l'aider et de le seconder en lui fournissant les informations adéquates tout au long de son travail si de nouvelles tâches advenaient. L'architecture de l'IHM proposée par les auteurs est observable via la figure 72.

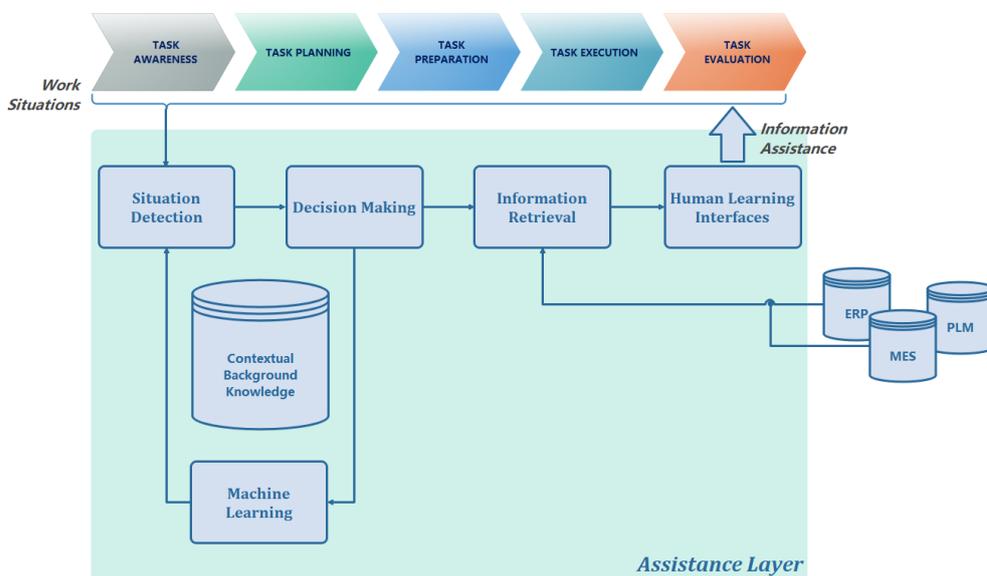


Figure 72: Architecture de l'IHM proposée par Aehnelt et alii en 2015 (Aehnelt and Urban, 2015) et (Aehnelt and Wegner, 2015).

L'architecture proposée permet de détecter la situation vécue par l'opérateur via un système de capteurs : les auteurs mentionnent des capteurs infra-rouges, une centrale à inertie, et un capteur de force. La captation des éléments contextuels (localisation, etc.) donne lieu à une étape de pré-calcul effectuée à l'aide d'une carte Arduino.

La prise de décision est faite grâce au calcul des éléments contextuels mis en perspectives avec le *Contextual Background Knowledge*, provenant d'une mise en relation des données de connaissances issues des systèmes utilisés par l'entreprise en plus de l'*Expert Knowledge* énoncé précédemment (dans la figure 72, cela correspond aux blocs : *Decision Making* et *Information Retrieval*). Enfin, les informations débouchent sur l'interface homme-machine. Les auteurs reprennent le terme créé par Koper de *Human Learning Interface* (Aehnelt and Wegner, 2015) mais le renomme plus tard plus prosaïquement *Information Visualization* (Aehnelt and Urban, 2015).

Nous pouvons dresser un parallèle entre l'architecture de l'IHM présentée par les auteurs ([Aehnelt and Urban, 2015](#); [Aehnelt and Wegner, 2015](#)) dans la figure précédente et notre classification des technologies immersives et interactives.

Ainsi, dans le cas de l'architecture développée par Aehnelt et alii, ([Aehnelt and Urban, 2015](#); [Aehnelt and Wegner, 2015](#)), nous pouvons considérer que l'étape de détection de la situation, *Situation Detection*, est lié aux capacités de la machine à percevoir l'environnement et à traiter ces perceptions en tant que données d'entrée. Vis-à-vis de notre classification, cela correspond aux fonctions *Captation*, *Suivi* et *Interface* (reconnaissance).

Les étapes, *Decision Making*, en liaison avec le *Contextual Background Knowledge* et le bloc d'*Information Retrieval*, établissent un lien entre les logiciels de l'entreprise et les données captées par le dispositif interactif utilisé par l'individu sur le poste de travail. La dernière étape, *Human Learning Interface*, ou *Information Visualization*, fait écho aux fonctions *Restitution*, en ce qui concerne le moyen de restitution de l'interaction de la machine vers l'homme, et la fonction *Interface* (retour d'informations), dans l'optique de retrouver l'information contextualisée et d'interagir avec celle-ci. Nous renvoyons le lecteur au chapitre dédié à la description de notre classification s'il lui était utile de se remémorer notre classification et le contenu théorique de chacune de ses composantes : (voir [partie UNE, chapitre II, section 1](#)).



Figure 73: L'IHM développée par Aehnelt et Urban ([Aehnelt and Urban, 2015](#)) et Aehnelt et Wegner ([Aehnelt and Wegner, 2015](#)).

Aehnelt et Wegner ([Aehnelt and Wegner, 2015](#)) ont insérés dans l'étape de manipulation des données une boîte intitulée Machine Learning. Selon eux, il est nécessaire de posséder une telle technologie pour que celle-ci puisse délivrer l'information contextualisée, ce qui nous semble pertinent même si nous ne nous adosserons pas à cette technologie dans le cadre de nos recherches. Cela impliquerait d'intégrer une brique d'intelligence artificielle pour laquelle une étude approfondie serait nécessaire, étude non réalisée dans le cadre de cette thèse.

Le résultat de la HLI développée dans le cadre des publications écrites par les auteurs est disponible en figure 73. On peut y voir, sur la colonne de gauche, les tâches qui peuvent être réagencées selon les souhaits de l'opérateur, celles-ci sont regroupées par sous-ensemble (en allemand dans la figure 73 : *Baugruppe 1* et 2). Sur la colonne de droite, les outils et matériels nécessaires pour effectuer la tâche sélectionnée (figure 73 : *Sicherung*

GA-210 einsetzen. Comprendre : Insérer fusible GA-210). La partie centrale montre la zone d'assemblage agrémentée d'informations contextualisées virtuelles.

Point intéressant à signaler : la possibilité pour les opérateurs d'insérer des notes dans l'IHM par l'intermédiaire du bouton *Anmerkung* (traduction : *Remarque*), si des problématiques ont été relevées par l'éditeur de la note. On le voit sur la figure 73 où une note a été écrite (la petite bulle verte).

Une expérimentation a été réalisée par Aehnelt et Urban dans lequel ils avaient intégrés un problème de séquençage des tâches d'assemblage de composants électroniques sur un circuit imprimé. Le test comprenait des opérations de planification des activités de manipulation, de perçage, d'insertion et de contrôle de plusieurs composants. Sans entrer dans le détail de la procédure, ni du nombre de personnes ayant participé, les auteurs énoncent un gain de rapidité neuf fois supérieur avec l'architecture intelligente pour réagencer les tâches d'assemblage par rapport au temps pris pour résoudre le problème sans l'interface.

IV.1.2 Notre proposition d'environnement intelligent à l'usage d'un dispositif interactif

Fort des concepts élaborés par Koper (Koper, 2014) et de l'intégration de ceux-ci sur une application industrielle faites par Aehnelt et Urban (Aehnelt and Urban, 2015) et Aehnelt et Wegner (Aehnelt and Wegner, 2015) qui semble prometteuse malgré le manque de données d'expérimentation factuelles, nous avons procédé à la schématisation d'un environnement dans lequel nous pourrions insérer notre classification des technologies immersives et interactives. Cette schématisation nous permettra, par la suite, de procéder à l'élaboration d'une interface qui reprendra la plupart des points définis par Koper dans ce qu'il considère être une interface intelligente.

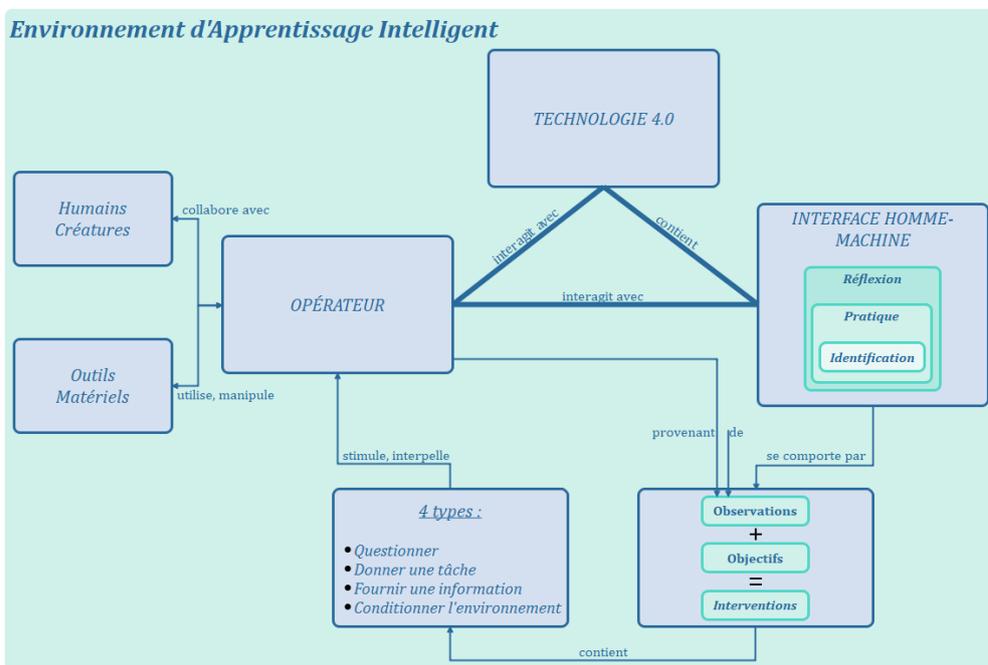


Figure 74: Un environnement d'apprentissage intelligent. Le triptyque technologie 4.0, opérateur et IHM sont au cœur de celui-ci.

Nous considérons un environnement d'apprentissage intelligent comme celui exposé en figure 74. Un triptyque d'interaction entre l'homme, la machine et l'interface se trouve au

centre des attentions. Par ailleurs, l'opérateur collabore avec d'autres entités, des humains, des *créatures*, et manipule toutes sortes d'outils et de machines. L'interface, procède par concaténation d'observations, provenant de l'environnement lui-même ainsi que des interactions avec l'homme, et d'objectifs définis comme les vecteurs de la performance sur la ligne de production où travaille l'opérateur.

Ces observations et ces objectifs concourent à la définition d'*interventions*, qui seront portées à l'attention de l'individu via le système de restitution que possède sa technologie 4.0. Ces *interventions* peuvent revêtir quatre formes que Koper avait exposé dans son article de 2014 : questionner l'individu, lui prescrire une tâche, lui fournir une information utile (un point d'attention inhérent à un problème de sécurité récurrent par exemple), ou bien conditionner l'environnement à toute fin utile.

Pour que cette IHM puisse fournir ces quatre types d'*interventions*, il est nécessaire que celle-ci procède selon le graphique que nous exposons en figure 75. Comme explicité par Aehnelt et alii dans les précédents articles et exposé dans le paragraphe précédent, l'interface agit de la façon suivante :

Une détection de la situation, du contexte, à l'aide de ses outils de captation (capteurs divers) et de suivi des mouvements de l'opérateur et des avatars quelconques qui sont traqués dans la scène car considérés comme importants. Les interactions de l'homme avec la machine sont aussi prises en compte par la fonction de reconnaissance de l'interface.

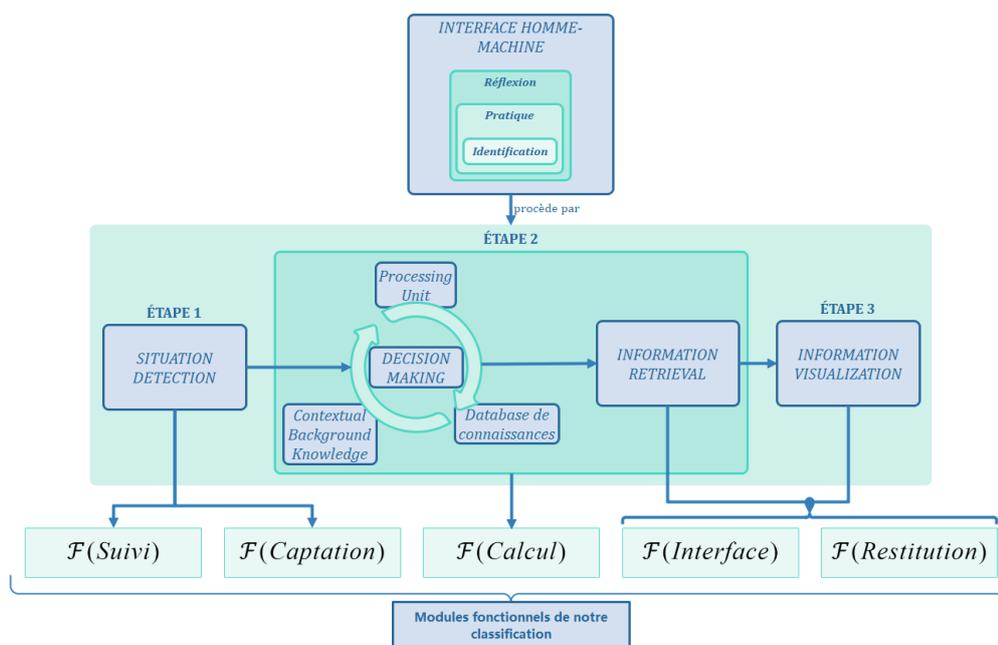


Figure 75: Architecture d'une IHM adaptée d'après les travaux de (Aehnelt and Urban, 2015; Aehnelt and Wegner, 2015). Nous faisons le lien ici avec notre classification des technologies.

Cette détection donne lieu à un traitement ultérieur au sein de l'unité de calcul qui procède aux opérations nécessaires pour fournir à l'individu les informations qui lui seront indispensables par la suite. La connexion du système avec les logiciels de l'organisation, les éventuels retours d'informations provenant des chaînes de fabrication via le jumeau numérique ou l'IoT contribuent à l'alimentation de la chaîne décisionnelle de la machine dans l'interface. L'existence éventuelle de bases de données (*database de connaissances* dans la figure 75) permettant d'être consultées peuvent aussi participer à ce processus décisionnel. Enfin les modes opératoires usuels, définis par ailleurs lors du développement des lignes de production (*Contextual Background Knowledge*) par les

experts knowledge, typiquement les ingénieurs process et méthodes, sont également pris en compte.

Enfin, une restitution des informations via un retour d'information, par l'intermédiaire de l'organe de restitution et/ou de l'interface est effectué. Cette restitution contextualisée, ce sont les *interventions* de Koper. Dans le cas de situations connues, le processus de décision se base sur un triptyque faits/procédures/concepts où l'IHM retourne les informations usuelles, qui ont été rendues robustes par les multiples itérations faites par les divers intervenants ayant opérés sur le poste grâce à celle-ci (HLI de Pratique), et qui ont certainement permis de les améliorer au cours du temps (HLI de Réflexion). Nous avons repris le terme défini par Aehnel et Wegner ([Aehnel and Wegner, 2015](#)) et nommé ce triptyque de travail basé sur une situation usuelle connue : *Rule-Based Control of Action*.

Nous joutons notre classification aux concepts de Rob Koper pour établir un lien préparatoire que nous étayerons précisément avec les critères du capacitant dans la [partie DEUX, chapitre premier - Promouvoir le couple Homme-Machine dans l'industrie](#). Pour l'heure nous devons prospecter le champ de la gestion et de la captation des connaissances en industrie afin d'ajouter une situation nouvelle ou inconnue et que Aehnel et Wegner ([Aehnel and Wegner, 2015](#)) nomment *Knowledge-Based Control of Action*. Ce sera le sujet de la section 2 de ce chapitre : [Partie UNE, chapitre IV, section 2 – Captation et gestion des connaissances dans l'industrie](#).

Section 2 Captation et gestion des connaissances dans l'industrie

IV.2.1 Le modèle de gestion de la connaissance

Les travaux initiaux concernant la création et la gestion de la somme des connaissances produites au sein d'une organisation remontent à 1991. Ce sont les chercheurs Japonais Nonaka et Takeuchi qui ont élaboré l'expression Knowledge Management (pour Gestion de la Connaissance) dans l'article fondateur ([Nonaka, 1991](#)). Pour élaborer ce concept, ils exposent le cas de développeurs de l'entreprise Matsushita Electric Company (renommée en Panasonic Corporation en 2008) qui tentaient à la fin des années 80 de concevoir une machine à faire le pain. Cependant, malgré leurs nombreux essais, la machine brûlait la croûte de celui-ci. L'un des concepteurs est parti observer la technique de pétrissage de la pâte faite par un grand chef dans un palace de la ville. Après un an d'observations, et de nombreux essais toujours infructueux, les concepteurs ont finalement réussi à reproduire la technique de pétrissage de la pâte à l'intérieur de leur machine grâce à l'ajout de nervures dans le fond de la structure de la machine. Ce que les chercheurs signifient à travers cet exemple, c'est la façon dont les concepteurs de la machine se sont servis d'une connaissance personnelle, acquise tout au long d'un difficile apprentissage par expériences successives et difficile à formaliser pour être partagé. C'est une connaissance *tacite*. Celle-ci est implicite, et subordonnée à la personne qui la détient. Elle est sous-jacente à l'expérience, le bon sens, les compétences, etc., et est difficilement transférable.

Par opposition, Nonaka et Takeuchi explicitent comment les concepteurs ont transformé le savoir tacite du grand chef boulanger en connaissances formalisées au sein d'un cahier des charges : ce savoir, ce sont des connaissances *explicites*, car la formalisation de celles-ci permet un partage et une communication aisés. La connaissance explicite peut donc se présenter sous forme de documents écrits divers, tels que des guides d'utilisation, des cahiers des charges, des modes opératoires, etc., et peut facilement être transférée et consultée au sein d'une base de données.

IV.2.1.1 La spirale des connaissances

Pour Takeuchi et Nonaka, la connaissance est un processus d'accumulation et de transmission itératif provoqué par l'*internalisation*, la *socialisation*, la *combinaison* et l'*externalisation* du savoir de chacun des membres de l'entreprise. Ce processus itératif est nommé *spirale des connaissances* par Nonaka et Takeuchi. Ceux-ci désignent même le processus comme étant primordial à une entreprise si elle ne veut pas voir la qualité de ses produits et sa rentabilité décroître inexorablement. La *spirale des connaissances* est donc basée sur la transmission de connaissances, explicites et tacites, ainsi que sur la capacité qu'ont les individualités à transmettre leurs informations au collectif. Il en ressort le schéma itératif suivant (fig.76) :

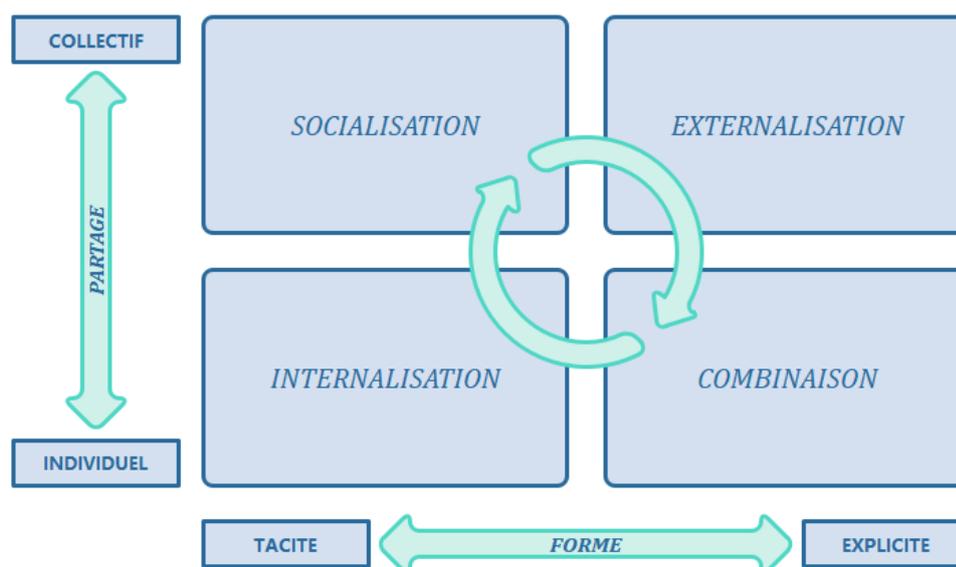


Figure 76: Processus itératif de transmission des connaissances dans une organisation. D'après Nonaka et Takeuchi (Nonaka, 1991).

Le modèle de Nonaka et Takeuchi définit quatre modalités de conversion de la connaissance dans une organisation

1. Du tacite individuel vers le tacite collectif : la *socialisation*. La socialisation est le processus d'interaction des individus au sein d'un groupe qui permet l'ajustement de l'intersubjectivité et l'intégration culturelle. L'apprentissage se fait par observation consciente ou non, par partage d'expérience ou communauté de pratiques. A ce niveau, il n'y a aucun recours à la codification ;
2. Du tacite collectif vers l'explicite collectif : l'*externalisation* ou formalisation. La formalisation consiste à expliciter, par le discours ou l'écrit, des pratiques et des croyances. Ce processus nécessite l'adoption d'un langage commun, comme celle de concepts partagés ;
3. De l'explicite collectif vers l'explicite individuel : la *combinaison*. Au moyen d'un langage commun, il est possible de transmettre des connaissances explicites qui sont combinées, rapprochées, pour produire, par induction, déduction ou hybridation, des connaissances nouvelles chez les individus ;
4. De l'explicite individuel vers le tacite individuel : l'*internalisation* ou intériorisation. On désigne par intériorisation, l'enracinement de la connaissance explicite dans des séquences pouvant atteindre le stade de réflexe ou d'automatisme s'accompagnant, normalement, d'un gain d'efficacité.

Ce mécanisme de captation des connaissances de chacun pour l'amélioration des processus de l'organisation nécessite cependant un cadre pour générer cette émulation, et ce cadre, c'est l'organisation qui peut la fournir. Il faut donc que celle-ci permette aux groupes qui la composent, les différents services d'une industrie (R&D, production, logistique, etc.) par exemple, ainsi que les individualités qui y manœuvrent, puissent avoir les moyens de mettre en place ce mécanisme de captation et de gestion de la connaissance.

IV.2.1.2 Le management de la connaissance en entreprise

Dans leur livre « *La connaissance créatrice : La dynamique de l'entreprise apprenante* » paru en 2015 (Nonaka and Takeuchi, 2015), Nonaka et Takeuchi exposent cinq conditions nécessaires afin de « *fournir le contexte adéquat pour faciliter les activités de groupe autant que la création et l'accumulation de connaissances au niveau individuel* » :

- L'intention : Première condition nécessitant la mise en place d'une stratégie visant à choisir le type de connaissances à capturer et le processus de captation de celle-ci. La stratégie doit être issue d'une vision globale de la part des instances dirigeantes qui autorisent par la suite, les individus à procéder à la réalisation de cette première intention. Ces instances permettent ainsi l'émergence de la seconde condition ;
- L'autonomie : Chaque individu possède une marge de manœuvre suffisante fournie par l'organisation pour procéder à l'élaboration de nouvelles connaissances. Au sein des espaces de socialisation permis par la hiérarchie, les individus peuvent ainsi partager leur savoir acquis et faire diffuser la connaissance dans l'organisation ;
- La fluctuation et chaos créatif : La fluctuation est selon Nonaka et Takeuchi un ordre sans récursivité. Cet ordre oblige ainsi à s'ouvrir aux aléas rencontrés lors du fonctionnement des processus de création de la valeur, de les prendre en compte et de ne pas nécessairement les rejeter comme faisant partie de défauts de production. Les auteurs exposent par ailleurs que « *quand la fluctuation est introduite dans une organisation, ses membres sont confrontés à une rupture des routines, des habitudes et des schémas cognitifs. La fluctuation dans l'organisation peut provoquer le chaos créatif qui induit et renforce l'engagement subjectif des individus* » ;
- La redondance : La connaissance partagée par un individu n'est pas nécessairement immédiatement utile pour les autres individualités du groupe. Les auteurs expliquent que « *l'information redondante permet aux individus de franchir les frontières fonctionnelles et de fournir des conseils ou de nouvelles informations issues de perspectives différentes* ». Le savoir est contextualisé par l'expérience de l'individu dans une situation donnée. Le partage de ce savoir permet à celui-ci d'être réutilisé par la suite par un autre individu qui saurait se réapproprier l'information issue de ce savoir et l'utiliser dans un contexte similaire mais éventuellement non identique pour créer une connaissance supplémentaire qu'il aurait l'occasion de partager à posteriori ;
- La variété requise : La diversité et la complexité des environnements de travail des individus doit être compensée par une mise à disposition des informations que ceux-ci considèrent comme utiles, au moment opportun, et ce, le plus rapidement possible.

Le processus de création de savoir dans l'organisation est précisément spécifié par Nonaka et Takeuchi (Nonaka and Takeuchi, 2015). Celui-ci prend la forme de 5 phases distinctes :

- 1) Le partage des connaissances tacites : L'organisation doit pourvoir aux besoins des individus de partager les connaissances tacites qu'ils ont détectés comme savoir utile à l'amélioration continue des pratiques au sein du service dans lequel évoluent ces personnes. Ceci passe par des disponibilités spatiales et temporelles pour les individus qui doivent pouvoir échanger dans un espace dédié et posséder un temps consacré pour échanger ;
- 2) La création de concepts : L'individu pourvoyeur de savoir confronte sa connaissance tacite à ses collègues par l'explicitation de celui-ci. L'interaction résultante de cette émulation transforme le savoir tacite en connaissance explicite par le truchement de la confrontation des idées au sein de l'espace de débat. Le résultat est un savoir conceptualisé et explicite ;
- 3) La justification des concepts : Cette connaissance explicite nouvelle doit être validée par les instances qui évaluent *ce qui devrait être* par *ce qui est*. Cette connaissance est-elle utile pour l'organisation ? La procédure de justification du concept passe par la réponse à cette question ;
- 4) La construction d'un archétype : Le concept justifié et explicite est transformé en substance tangible et concrète. La naissance d'un archétype est la combinaison de la connaissance explicite nouvelle avec le(s) savoir(s) explicite(s) existant(s) précédemment ;
- 5) L'extension de la connaissance : Le savoir nouveau, explicite et bâti est disponible à l'internalisation par les individus qui ont potentiellement intérêt à l'utiliser. Celui-ci peut donner lieu à un nouveau cycle de création de savoir ultérieur.

La possibilité d'agir pour les individus au sein d'une organisation afin de générer du savoir nouveau est corrélé fortement à la capacité du management à octroyer cette possibilité d'action aux groupes qui composent l'organisation. Antérieurement, le management fonctionnait de manière binaire et duale : un management haut-bas où les dirigeants du *top management* définissent des plans et transmettent les ordres aux couches immédiatement inférieures qui répercutent, par ruissellement, ces ordres jusqu'aux couches les plus basses de la pyramide de l'organisation. Ce modèle fut défini par Max Weber et Frederick Winslow Taylor, notamment à travers le concept de *division du travail*. Ce type de management génère un nombre conséquent de connaissances explicites mais entrave la construction de nouveaux savoirs basés sur les connaissances tacites acquises en situation.

L'autre type de management est le management bas-haut. Ici, les strates hiérarchiques sont réduites à n'être que des sponsors qui valorisent l'esprit individuel au sein d'une pyramide de la hiérarchie « écrasée ». Il y a émergence de connaissances tacites grâce à l'esprit « entrepreneurial » valorisé par la hiérarchie mais la diffusion et le partage de ces connaissances tacites sont largement entravés par l'autonomie très importante des individus au sein de l'organisation.

Nonaka et Takeuchi préconisent donc un nouveau type de management : le management milieu-haut-bas. La clé de voûte de ce système sont les cadres intermédiaires de l'entreprise. Le *top management* du site industriel fournit la vision à long terme, il définit la stratégie, *ce qui devrait être*. Les cadres intermédiaires agissent en tacticiens, en posant le cadre conceptuel concret dans lequel peuvent s'exprimer les individualités au sein des groupes composants l'organisation, afin de faire évoluer *ce qui est* (fig.77).



Figure 77: Le management milieu-haut-bas préconisé par Nonaka et Takeuchi (Nonaka and Takeuchi, 2015) où le management intermédiaire possède les clés de médiation entre *ce qui est* et *ce qui devrait être*.

Un exemple de captation de la connaissance appliqué au domaine de la réalité augmentée pourrait être celui que nous explicitons juste après, au niveau de la construction d'une application de RA dédiée à la maintenance.

Dans le cadre d'un management de type milieu-haut-bas, nous pourrions exposer deux formes de collaborations distinctes : une opération guidée (ou asynchrone) et une opération assistée (ou synchrone) sont explicitées par Havard et Baudry (Havard and Baudry, 2019) via les figures 78 et 79. Nous détaillons chacune d'elle ci-après.

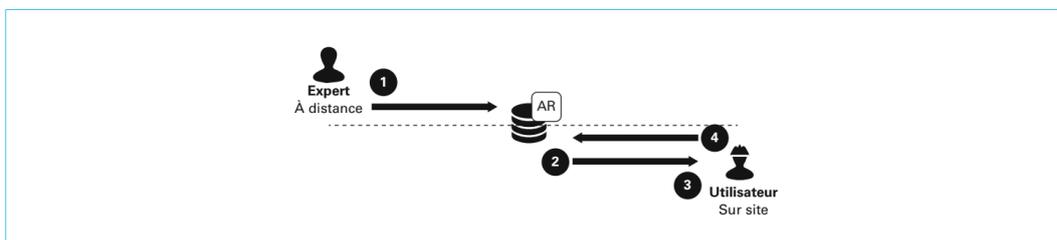


Figure 78: Opération guidée ou asynchrone telle que définie par Havard et Baudry (Havard and Baudry, 2019).

Dans le cadre d'une opération guidée ou asynchrone :

- 1) L'expert définit un mode opératoire utile à la complétion d'une tâche prescrite de maintenance qui sera utilisé à l'aide d'un dispositif interactif de RA ;
- 2) L'utilisateur charge ce mode opératoire en amont de la tâche de maintenance à effectuer. Ce chargement s'effectue en entreprise avant de se rendre sur le site où il devra opérer la tâche prescrite ;
- 3) Une fois sur site, l'individu se sert du mode opératoire défini a priori par l'expert pour résoudre la tâche de maintenance prescrite. Le savoir découle de l'expert vers l'utilisateur. Si celui-ci, au travers du contexte de maintenance, élabore une connaissance situationnelle, il peut la consigner par des commentaires et analyses pour un partage ultérieur auprès des collègues et de l'expert ;
- 4) De retour sur site, l'expert peut prendre connaissance des annotations faites en situation par l'opérateur.

Ce type de fonctionnement est utile pour faire « remonter » la connaissance au niveau intermédiaire, par le truchement de ce qui était exposé précédemment sur les moyens donnés par l'organisation pour permettre ce type de fonctionnement d'amélioration continue, et ainsi pourvoir à l'évolution des bonnes pratiques et du savoir partagé dans l'organisation. En revanche, la disruption temporelle, notamment dans le cadre de situations très spécifiques, peut générer une incompréhension par les cadres intermédiaires qui ne verraient alors pas la pratique comme pertinente et la rejetteraient à tort. L'opération assistée permettrait de pallier à cet éventuel écueil, nous détaillons celle-ci.

L'opération assistée ou synchrone est utile principalement lorsque qu'un évènement imprévu émerge dans le contexte de maintenance. La situation est décrite comme suit :

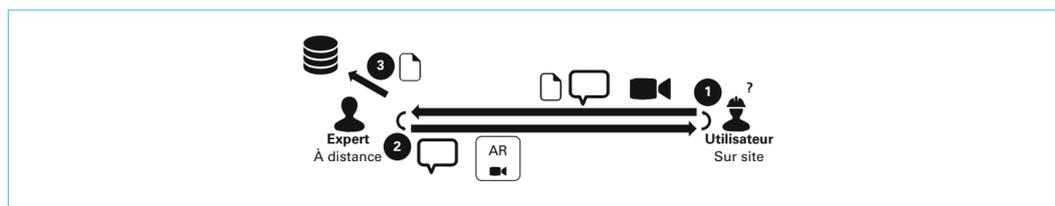


Figure 79: Opération assistée ou synchrone telle que définie par Havard et Baudry (Havard and Baudry, 2019).

- 1) L'utilisateur rencontre une fluctuation non récurrente, un aléa non documenté dans l'application. En conséquence, il contacte l'expert ;
- 2) L'expert peut interagir avec l'opérateur à distance via des moyens à discuter lors du développement de l'application. Les moyens usuels de restitution rencontrés sont des interactions visuelle et auditive (fig.79), mais d'autres formes d'interactions peuvent exister et/ou devront être développées dans le futur. Ces interactions en temps réel ont pour objectif de permettre à l'individu sur site de pouvoir résoudre la problématique ;
- 3) La synchronisation en temps réel du dispositif interactif de l'opérateur avec le système d'interaction de l'expert permet une remontée des informations dans une base de données dédiée. La fluctuation pourra ainsi être discutée ultérieurement par les différentes parties prenantes et éventuellement générer un savoir explicite futur.

Cette technique de captation en temps réel de la connaissance issue de la fluctuation est ce sens que le partage du savoir tacite et la création du concept peuvent être élaborés *in situ* et non pas *a posteriori*, en lien direct entre les instances génératrices de savoir tacite, les opérateurs en situation de travail, et les personnels en charge de la conversion du savoir tacite en connaissance explicite, les cadres intermédiaires. Cela pose cependant quelques problèmes techniques. Il est nécessaire de pouvoir créer un pont de transfert de données par l'intermédiaire de la mise en place de technologies permettant ces transferts. Des technologies telles que la Wi-Fi par exemple peuvent aider à générer des ponts de communication fluides entre deux individus à distance.

IV.2.1.3 De l'art de communiquer la connaissance tacite acquise sur le terrain

Communiquer ses idées n'est pas une mince affaire. « *Tous autant que nous sommes avons déjà vécu la situation où nous tentions de faire passer un message qui fut, par le truchement, d'une phrase lourde et confuse, et dont les circonvolutions sémantiques subséquentes qui avaient pour objectif de décrire avec précision le modèle de pensée que nous tentions alors de faire passer, eu pour effet de ne rendre l'explication que plus absconse* ». La phrase

précédente est performative, elle rend compréhensible ce que nous énonçons : Transmettre un raisonnement ou un savoir n'est point chose aisée.

Une connaissance ou un raisonnement ne sont pas des structures linéaires, elles sont à la jonction de ramifications diverses dans un tout foisonnant où l'expérience, les faits, la culture et les capacités cognitives de l'individu, permettent à celles-ci d'émerger : ce sont des structures foisonnantes. Transmettre une connaissance et/ou un raisonnement à autrui, par le discours ou par l'écrit, suppose d'avoir transformé cette structure foisonnante en structure linéaire. Or, cette transformation, cet encodage par le transmetteur (du foisonnant vers le linéaire), mais aussi, le décodage par le récepteur (du linéaire vers le foisonnant) sont des processus cognitifs et perceptifs qui peuvent influencer sur le message initial, et le rendre inaudible, imperceptible, voire incompréhensible.

Dans un cadre industriel où le savoir tacite de l'un doit permettre une appropriation par les autres, sous couvert d'avoir préalablement compris, élaboré et justifié le concept sous-jacent à cette connaissance, il faut pouvoir être compris sans discours long et/ou abscons. « *Un bon croquis vaut mieux qu'un long discours* » disait Bonaparte. C'est sur la base de cet état des lieux qu'il faut définir une boîte à outil de la communication efficace.

Prenons le cas d'un syllogisme répandu : « Untel est un homme, tous les hommes sont mortels, donc Untel est mortel ». Cette proposition peut s'exprimer de six façons différentes :

- 1) Untel est un homme, tout homme est mortel, donc Untel est mortel
- 2) Untel est un homme, donc Untel est mortel, car tout homme est mortel
- 3) Untel est mortel, car Untel est un homme, et tout homme est mortel
- 4) Untel est mortel, car tout homme est mortel, et Untel est un homme
- 5) Tout homme est mortel, donc Untel est mortel, car Untel est un homme
- 6) Tout homme est mortel, or Untel est un homme, donc Untel est mortel

Si ce texte est plutôt ardu à comprendre, c'est parce que la personne le lisant doit découper la phrase en trois concepts plus basiques (« Untel est un homme », « Tout homme est mortel », et « Untel est mortel ») et dissocier ceux-ci par des virgules, des points, etc., et des marqueurs de raisonnement comme les conjonctions de coordination suivantes : « or », « donc », et « car ».

La problématique de scission et de compréhension de l'ensemble, empirerait à l'évocation de concepts plus ardues à comprendre que ceux exposés dans notre exemple ou si le concept global revêtait un nombre plus important de concepts à prendre en compte. Des travaux de chercheurs en sciences cognitives ont permis de permettre une visualisation de ces informations afin de permettre une meilleure compréhension des concepts sous-jacents à un savoir tacite notamment. C'est ainsi que Card et alii (**Card et al., 1999**) ont défini la visualisation de l'information comme « *l'utilisation de représentations visuelles interactives de données abstraites assistées par ordinateur afin d'améliorer la cognition* »²². Dans son livre « *Design de l'information – Représenter visuellement les informations* », Isabel Meirelles (**Meirelles, 2014**), détaille entre autres les fonctions cognitives pouvant être activées à l'aune de la diffusion d'informations visuelles : « *Consigner l'information / Communiquer le sens / Renforcer la mémoire de travail / Faciliter la recherche / Faciliter la découverte / Susciter l'inférence perceptive / Favoriser la détection et la reconnaissance / Offrir des modèles de mondes réels et théoriques / Permettre la manipulation de données* ». Finalement, Martin Haussmann (**Haussmann, 2019**) résume bien l'idée transmettre ses idées/raisonnements/connaissances par l'intermédiaire de la visualisation : « *La visualisation offre tout un champ de possibles pour développer des idées, s'approprier ou*

²² « *Information visualization is the use of computer-supported interactive visual representations of abstract data to amplify cognition* ».

transmettre un savoir, trouver des solutions à deux ou à plusieurs et accompagner des projets de changement ».

Parmi les méthodes existantes de pensée visuelles qui peuvent être évoquées, notons la méthode de construction Scripto-Graphique à Hyperliens. Cette méthode permet d'associer des idées par construction graphique. La figure 80 permet de se faire une idée de la simplicité de la transmission de l'information à travers l'exemple de notre syllogisme. Dans celui-ci, l'articulation du raisonnement est visible immédiatement, le découpage des concepts est clair et immédiat, le nombre de symboles présents est moins important (pas de ponctuation, de séparateur de concepts, ni de marqueurs de raisonnement), il est possible de lire le schéma de haut en bas (cause -> conséquence) ou de bas en haut (conséquence -> cause).

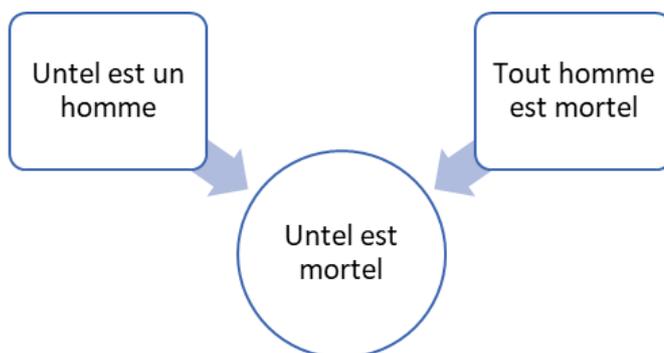


Figure 80: Notre exemple de syllogisme illustré par la méthode scripto-graphique par hyperliens.

Dans le cas de figure où un individu souhaiterait confronter une connaissance tacite créée, il pourrait, à travers l'interface du dispositif interactif de RA et une boîte à outils dédiée, construire le raisonnement préalable à la justification du concept sous-jacent au savoir tacite qu'il détient et qu'il compte partager avec l'organisation. Cette boîte à outil serait permise grâce à la réflexion préalable des développeurs sur l'élaboration d'une interface à trois niveaux d'entrée :

- La première, une interface d'identification : l'individu apprend à compléter les tâches prescrites par une phase d'apprentissage basée sur la procédure élaborée dans le cadre usuel (modèle *Rule-Based Control of Action*) ;
- La seconde, une interface de mise en pratique : l'individu formé se pare du dispositif interactif dans les cas où la situation usuelle est oubliée (modèle *Rule-Based Control of Action*) ou dans le cas d'éventuelles fluctuations de production, afin d'être guidé ou assisté dans la bonne complétion de ses tâches à effectuer (modèle *Knowledge-Based Control of Action*) ;
- La troisième, l'interface de réflexion, issue des travaux de Koper, et du changement de paradigme organisationnel tel que préconisé par Nonaka et Takeuchi, permet à l'opérateur expert de pouvoir fournir une amélioration continue du processus de création de valeur comme de l'interaction de celui-ci avec la machine par le partage d'un savoir tacite acquis (modèle *Knowledge-Based Control of Action*).

Cette boîte à outil prendrait la forme d'une mise à disposition de formes basiques manipulables au sein de l'interface par l'utilisateur (des formes visuelles, un moyen de capture d'un flux audio/vidéo, de génération d'un flux audio et/ou vidéo, la restitution d'un geste spécifique à transmettre à autrui via l'apprentissage de celui-ci sur un cobot, etc.). Finalement, l'interface autoriserait l'élaboration d'une méthode scripto-graphique à hypermédias qui seraient disponible a posteriori lors de la phase de socialisation telle que définie par Nonaka et Takeuchi. Nous fournissons le cadre méthodologique de la réflexion inhérente à la mise en place d'un schéma d'amélioration continue, sans fournir le détail du contenu de la boîte à outil, celle-ci étant le travail d'une réflexion entre experts du

domaine de production (ingénieurs processus et production, opérateurs, techniciens de maintenance, etc.) et du domaine de la vision et de l'interaction (UX designers, développeurs RA, etc.). Cette boîte à outil serait largement corrélée au type de restitution permis par le dispositif interactif utilisé par les individus sur la chaîne de production.

IV.2.2 Notre proposition de captation de la connaissance en milieu industriel

Sur la base des modèles conceptuels élaborés par Koper (Interface homme-machine à trois niveaux d'entrée : néophyte, expérimenté et expert), Nonaka et Takeuchi (captation et gestion de la connaissance, et changement de paradigme de management), et les méthodes de communication scripto-graphique à hypermédias, nous avons défini un processus qui permet à un individu de capturer un savoir tacite élaboré en situation, de le convertir en « bonne pratique » dans le système interactif, pour le transmettre et le faire valider auprès de ses collègues et du superviseur de la production.

Dans le cas particulier du *Knowledge-Based Control of Action*, nous avons défini le processus applicable dans le cadre de notre méthodologie sur la base des éléments théoriques exposés tout au long de cette section. Ce processus est exposé en figure 81 et reprend la codification du BPMN pour son élaboration.

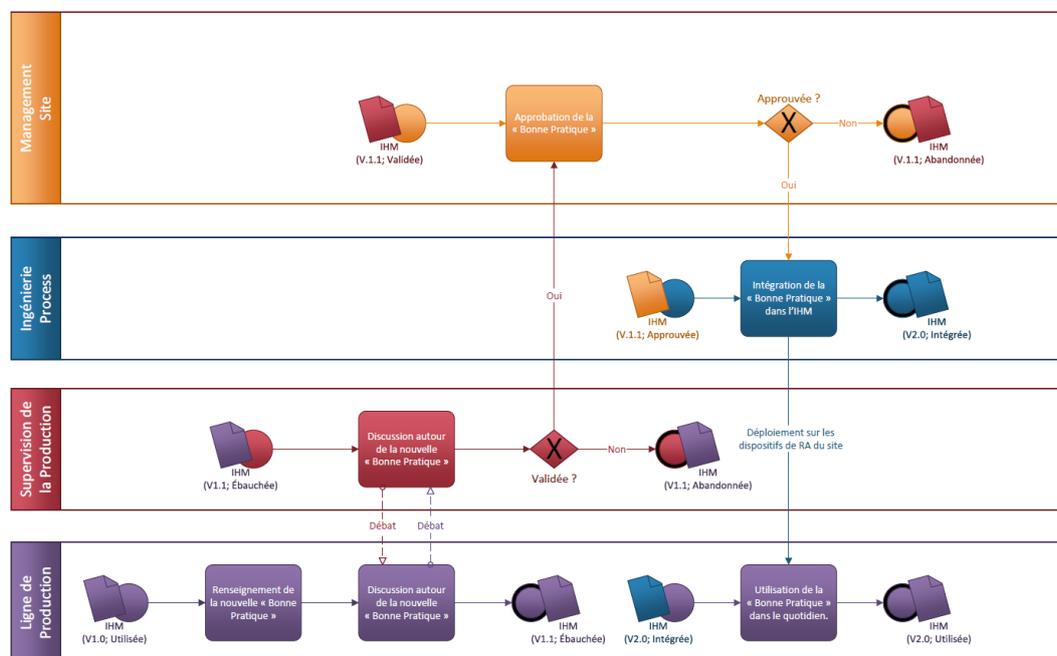


Figure 81: Diagramme BPMN du processus de création et de partage de la connaissance au sein d'une organisation.

Le partage du savoir est effectué via la complétion par l'opérateur d'une « bonne pratique » qui suit le processus suivant, basé sur la figure 81 :

- A l'aide de la boîte à outils contenue dans l'IHM, il renseigne le savoir qu'il souhaite partager. Sa formulation génère un passage d'un indice mineur dans l'interface et celle-ci prend l'état « d'IHM ébauchée » ;
- Le changement de paradigme de management de l'organisation permet la tenue d'espace d'échanges pour partager les expériences. C'est au sein de ces espaces que la « bonne pratique » est discutée avec le management intermédiaire, le superviseur de la production, éventuellement les ingénieurs processus, et les collègues de la ligne de production. A l'issue des échanges, la « bonne pratique »

est rendue explicite et validée par le management de la production. L'état de l'IHM est passé à « validée ».

- La validation par le management intermédiaire de *ce qui est* permet l'évaluation de la « bonne pratique » au niveau du *top management* qui statue sur *ce qui devrait être*. Si la corrélation entre les deux visions managériales est effective, l'IHM est approuvée et passe au statut « approuvée ».
- En redescendant au niveau intermédiaire, ce sont les experts du processus qui opèrent, et avec l'aide des ingénieurs RA ou par le truchement d'un logiciel dédié, ils convertissent l'IHM v.1.0 en une IHM v2.0 par l'intégration de la « bonne pratique » dans l'interface.
- L'IHM v2.0 est déployée sur les lignes de production et la « bonne pratique » sera éventuellement utilisée par les opérateurs au gré des situations et des contextes.

Appuyés sur l'ensemble des nombreux concepts décrits, et des différents modèles esquissés tout au long de cette première partie d'une part, et de l'objectif de collaboration entre les domaines du génie industriel et de l'ergonomie de l'activité que nous ébauchions lors du chapitre d'introduction, [Introduction générale, Contexte](#), d'autre part, nous pouvons désormais poser les fondamentaux théoriques de la boîte à outils du *Capacitant*, qui permettra par la suite, à l'aide d'une heuristique appropriée, de concevoir des Situations de Collaboration Homme-Machine Capacitantes. Ce sera l'objet du chapitre premier de la seconde partie du manuscrit. Ensuite, nous ferons l'état des lieux des tâches à réaliser pour parvenir à créer cette heuristique dans le chapitre II via l'explicitation des verrous scientifiques, techniques et méthodologiques à lever. Enfin, nous détaillerons les moyens mis en œuvre pour réussir à faire « choir ces bobinettes », en premier lieu, via notre réflexion sur la construction de notre méthodologie de conception d'activités de collaboration homme-machine, et en second lieu, par l'intermédiaire des moyens pour parvenir à faire valider par l'expérimentation tout ou partie de l'heuristique, dans le chapitre III.

***Partie DEUX : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE :
CRITÈRES DU CAPACITANT, OBJECTIFS, ET
MOYENS MIS EN OEUVRE***

Chapitre premier : Promouvoir le couple Homme-Machine dans l'industrie

Section 1 Genèse : De l'approche par les capacités à l'environnement capacitant

Nogier et Leclerc (**Nogier and Leclerc, 2016**) exposaient dans leur livre de 2016 que l'activité devait être séparée du point de vue de ce qui est prescrit, la tâche, de ce qui est fait effectivement par l'individu en situation de production, l'activité. Pour les auteurs, l'activité s'insère dans un contexte organisationnel qu'il faut prendre en compte pour pouvoir mesurer la complexité de la tâche. Leplat (**Leplat, 1997**) considère par ailleurs l'activité comme « un objet complexe qui s'inscrit dans un réseau de conditions qui la modèlent et qu'elle contribue inversement à modeler ». Nous explicitons cette différence en paragraphe III.2.2.2 du chapitre III (**Partie UNE, chapitre III, section 2**).

En parallèle, Falzon et Teiger (**Falzon and Teiger, 1995**) considèrent l'activité comme un compromis entre deux variabilités et une constante : la variabilité de l'opérateur ; les auteurs parlent de variabilité dans un temps court (la fatigue, l'ennui, etc.) et de variation dans un temps long (l'âge notamment) ; et la variabilité du système de production (aléas, dysfonctionnements. Nonaka et Takeuchi (**Nonaka and Takeuchi, 2015**) parlent de fluctuations). La constante selon Falzon est le résultat attendu par les exigences de la production en termes qualitatifs et quantitatifs. Finalement, il en ressort pour l'individu, un équilibre constant de conciliation de toutes ces variabilités par rapport à cette constante que Falzon désigne comme une « *méta-activité intégrant à la fois des connaissances techniques spécifiques de la tâche et des métaconnaissances acquises par l'expérience, portant sur le travail, son contexte et ses répercussions sur le sujet* ».

Dans le même article (**Falzon and Teiger, 1995**), Falzon et Teiger distinguent par ailleurs, les activités dites expertes des activités dites habiles. Les activités expertes sont régies par des règles : « *Les opérateurs sont généralement capables d'explicitier leurs actions, d'une part parce qu'ils en gardent un contrôle conscient, d'autre part parce que la charge cognitive induite laisse ouverte la possibilité de verbaliser* ». Les activités habiles sont gérées par des habiletés : « *Cette routinisation rend difficile (et douteuse) la verbalisation : celle-ci nécessite en effet une décompilation de la procédure, dont les résultats sont incertains* ». On retrouve ici la distinction faite par Nonaka et Takeuchi entre savoir explicite et savoir tacite.

A la fin des années 90, Amartya Sen, économiste de son état, publiait un livre (**Sen, 1999**) dans lequel il exposait comment les États européens pouvaient, à l'aide de politiques publiques pertinentes basées sur la liberté d'action et l'initiative, générer une économie fondée sur la connaissance : « *Les principes politiques fondés sur les capacités s'accordent bien avec la transformation du travail qui accompagne l'émergence d'une économie européenne fondée sur la connaissance. Pour être compétitives et innovantes, les normes d'emploi exigent responsabilité, initiative, autonomie et compétences relationnelles. Le déploiement de ces qualités exige des travailleurs qu'ils possèdent l'initiative et la liberté d'action réfléchie qui n'a pas de substitut technologique* »²³. Le concept de Sen expose le principe de capacité en faisant la distinction avec les capacités. Selon l'économiste, les capacités relèvent du savoir-faire de l'individu quand les capacités permettent la mise en application de ces capacités. Ainsi, les capacités détenues par les individus sont captées par les organisations grâce à un système de potentialités.

²³ "Capability-based policy principles fit well with the transformation of work that accompanies the emergence of a knowledge-based European economy. To be competitive and innovative, standards for employment require responsibility, initiative, autonomy and relational skills. The deployment of these qualities requires workers to possess initiative and the reflective freedom of action that has no technological substitute"

Ces potentialités, ce sont les ressources mobilisables par l'individu, tant du point de vue externe, via l'environnement de travail et l'organisation industrielle, que du point de vue interne, les caractéristiques intrinsèques de l'individu (fig.82). Ces potentialités vont subir des facteurs de conversion. Ces facteurs de conversion sont intimement liés à la situation vécue par l'opérateur au sein de son activité. Ceux-ci peuvent ainsi être incapacitants ou favoriser l'action qui en découle. Les variabilités de l'individu ou de l'environnement de travail exposées juste avant sont un exemple de facteurs de conversion possibles (fatigue, dysfonctionnements en production, etc.).

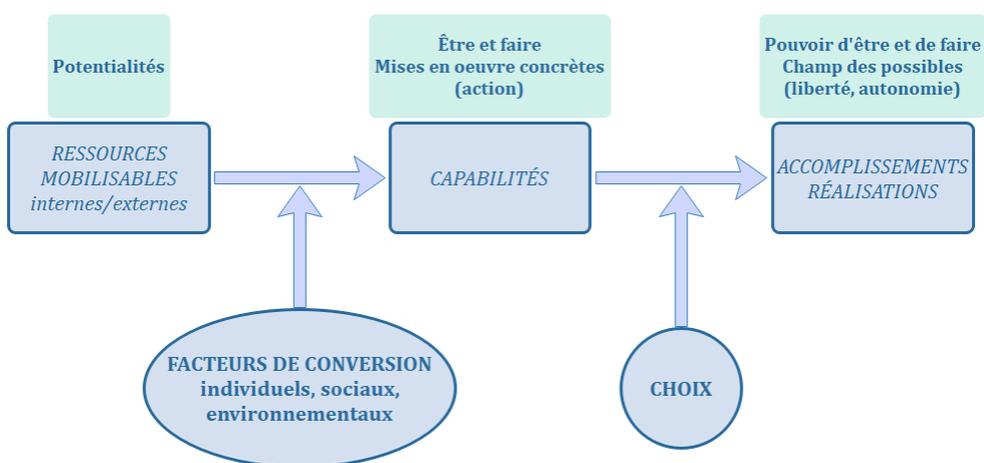


Figure 82: L'approche par les capacités. D'après Fernagu-Oudet (Oudet, 2012).

Finalement, à l'intersection entre les potentialités de l'individu et les facteurs de conversion vécus en situation, il découle un pouvoir d'agir que Sen appelle « capacité ». Ces capacités permettant à l'opérateur de faire un (ou des) choix pour accomplir les tâches prescrites et réaliser son activité. L'approche par les capacités permet ainsi la prise en compte des capacités intrinsèques de l'individu et pondère les opportunités que celui-ci possède pour réaliser son activité. C'est de cette approche, que l'idée d'**environnement capacitant** émerge, en 2005 grâce aux travaux de Pierre Falzon (Falzon, 2005).

L'auteur définit un environnement capacitant comme « un environnement qui permet aux personnes 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, c'est-à-dire leur autonomie ». Solveig Fernagu-Oudet (Oudet, 2012) ajoute: « [...] dynamiser les environnements de travail pour les rendre capacitants, consiste à aider les individus à mobiliser et utiliser les ressources qui sont à leur disposition et pas seulement les mettre à disposition ». Falzon donne trois points de vue qui permettent selon lui de générer un environnement capacitant :

1. Un point de vue préventif qui préserve les capacités d'action futures de l'individu tout en le prévenant de problématiques sécuritaires : « c'est un environnement non délétère pour l'individu, qui préserve les capacités futures d'action (détection et prévention des risques, élimination de l'exposition aux toxiques, élimination ou réduction des exigences aboutissant à des déficiences durables ou à des effets psychiques négatifs, etc. ».
2. Un point de vue universel qui permet à tous de pouvoir effectuer les tâches prescrites dans les conditions optimales : « c'est un environnement qui prend en compte les différences interindividuelles (liées aux caractéristiques anthropométriques, mais aussi au sexe, à l'âge, à la culture) et qui compensent les déficiences individuelles (liées au vieillissement, à la maladie, aux incapacités). Il prévient l'exclusion, les décrochages sociaux et générationnels et le non-emploi. Il favorise l'intégration, l'inclusion et la reconnaissance sociale ».

3. Un point de vue développemental qui, via un parallélisme avec le concept de Sen, élargie le champ d'action et l'autonomie de l'individu : « *c'est un environnement qui permet le développement de nouvelles compétences et de nouveaux savoirs, et l'élargissement des possibilités d'action et du degré de contrôle sur la tâche et sur l'activité. Il favorise l'autonomie et contribue au développement cognitif des individus et des collectifs ; accroissement de l'autonomie et développement des savoirs étant deux facteurs clés de l'extension du pouvoir d'agir* ».

C'est sur la base de ce troisième point de vue que (Coutarel et al., 2015; Oudet, 2012; Villemain and Lémonie, 2014) se basent pour élaborer le concept d'environnement capacitant et creuser plus encore la notion de pouvoir d'agir et de marge de manœuvre en situation (Coutarel et al., 2015). Fernagu-Oudet (Oudet, 2012) résume l'objectif d'un environnement capacitant comme suit : « [...] dynamiser les environnements de travail pour les rendre capacitants, consiste à aider les individus à mobiliser et utiliser les ressources qui sont à leur disposition et pas seulement les mettre à disposition ».

Par ailleurs, l'environnement capacitant n'est pas cantonné à la simple augmentation du pouvoir d'agir. Selon Falzon (Falzon, 2005) et Fernagu-Oudet (Oudet, 2012), les organisations ont intérêt à pratiquer un management collaboratif où les individus peuvent s'exprimer collectivement sur leurs pratiques de travail afin de s'enrichir mutuellement et d'apprendre collectivement des bonnes pratiques élaborées par les collègues. Falzon (Falzon, 2005) nomme cela « pratique réflexive », Fernagu-Oudet (Oudet, 2012): « réflexivité ».

Les temps de réflexion collective participent selon Falzon au développement des connaissances : « *Les réunions participatives créent des situations où les connaissances cachées sont rendues explicites, partagées et mises au point ou adaptées collectivement. Cela profite à la fois au travailleur individuel et à l'organisation dans son ensemble* »²⁴. Il existe plusieurs types de confrontation (allo-confrontation individuelle et/ou collective, auto-confrontation) mais nous ne rentrerons pas dans le détail de ces différentes pratiques au sein de ce manuscrit. On retrouve les pratiques de socialisation de Nonaka et Takeuchi (Nonaka and Takeuchi, 2015) où le savoir tacite est transformé en savoir explicite par discussion au sein d'un espace débat-travail (Clot and Fernandez, 2000) sur le savoir accumulé par un individu qui en ferait partager ses collègues. De plus, grâce au moyens scripto-graphiques à hypermédias que nous exposons au chapitre précédent ([Partie UNE, chapitre IV, section 2](#)), nous retrouvons le matériel indispensable, que préconisaient Mollo et Nascimento (Mollo and Nascimento, 2013) pour permettre la confrontation d'une pratique avec les collègues de la ligne de production. Ceux-ci peuvent alors discuter d'une bonne pratique à l'aune des hypermédias mis à disposition par l'individu ayant engendré un nouveau savoir dans le cadre d'un espace et d'un temps alloués par l'organisation pour pratiquer l'émulation collective.

Au-delà de la permission par l'organisation de pratique réflexives, d'abord individuelles pour apprendre de nouveaux savoirs et les formaliser pour un partage futur, il est nécessaire pour les managers de pourvoir une autonomie et une responsabilisation accrue des opérateurs. Ce type de management est appelé management habilitant et Boudrias et Bérard (Boudrias and Bérard, 2016) supposent le fait que ce type de management permet l'obtention d'un travail de meilleure qualité, d'un rendement plus élevé et d'une plus grande satisfaction au travail.

En résumé (fig.83), l'environnement capacitant permet l'augmentation du pouvoir d'agir des individus au sein d'un contexte de travail qui promeut, grâce à un management habilitant, la montée en compétences, par l'intermédiaire d'espaces débat-travail où les différents acteurs de la ligne de production peuvent partager leurs expériences et leurs savoirs acquis en situation via des pratiques de réflexivité individuelle et collectives. Par

²⁴ "Participatory meetings create situations where hidden knowledge is made explicit, shared and collectively tuned or adapted. These benefits both the individual worker and the organization as a whole"

ailleurs, l'autonomisation et la responsabilisation accrues des compétences et des connaissances qui en découlent permettent d'accroître les performances en production.

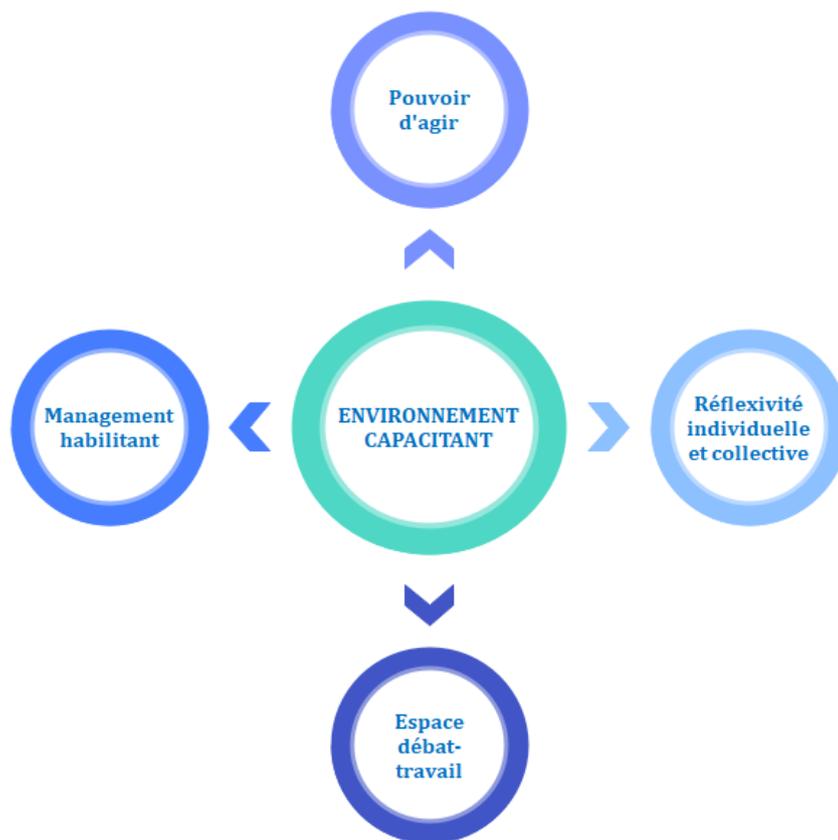


Figure 83: Les différents concepts associés à l'émergence d'un environnement capacitant.

L'émergence des nouvelles technologies d'aide à la production, notamment les technologies de RA, permettent de repenser le concept de l'environnement capacitant à l'aune des interactions Homme-Machine. Le concept de capacitant doit être réétudié afin d'y incorporer les changements d'évolution de l'individu dans l'environnement de travail quand celui-ci utilise un dispositif immersif et interactif. Les travaux de Rabardel (Rabardel, 1995), de Tricot et alii (Tricot et al., 2003), et de Coutarel et alii (Coutarel et al., 2015), permettront de faire la lumière sur l'apport pour le concept d'environnement capacitant, de l'adjonction d'une technologie de type Réalité Augmentée. Nous finirons par l'établissement des critères d'une Situation de Collaboration Capacitante selon les critères exposés à la fois dans la première section de ce chapitre ainsi que dans la section 2, au travers des travaux de Compan et alii (Compan et al., 2020).

Section 2 Acmé : Des conditions du couple Homme-Machine à travers le capacitant

Bobilier-Chaumon et alii (Bobilier-Chaumon et al., 2019) évoquent les technologies émergentes (cobots, IoT, Big Data, RA/RV, etc.) comme des innovations qui « visent à transformer radicalement les processus de travail, et plus spécifiquement les manières de penser, de faire, de collaborer ou encore d'organiser l'activité. Ces modifications ont des répercussions majeures sur les composantes psychiques, cognitives et sociales de l'individu au travail ». Le caractère disruptif de ces technologies dans un environnement industriel

laisse présager de gains substantiels de productivité et de flexibilité des moyens de production, mais il génère cependant un pendant péjoratif non négligeable pour les auteurs : « [...] les démarches généralement associées à la conception et au déploiement de ces outils suivent souvent une logique technocentrée : elles cherchent à tirer le meilleur profit de la révolution numérique en privilégiant l'efficacité informatique et la logique algorithmique, au détriment de l'action humaine et de l'intelligence pratique dont on sait l'importance pour la santé au travail ».

Compan et alii (Compan et al., 2020) ont évalué la dualité homme-machine au travers du Facteur Humain. Leurs travaux ont permis de classifier des concepts ergonomiques différents et de construire ainsi une classification dont pourraient se servir les ingénieurs et les décideurs lors de la conception de situations de collaboration homme-machine en industrie. Cette classification s'appuie largement sur les travaux de définition d'un environnement capacitant qu'elle enrichie de notions supplémentaires. Par ailleurs, cette classification prospecte précisément la dualité homme-machine dans le cadre de leur collaboration pour la complétion de tâches prescrites données en milieu industriel.

La classification d'une situation de collaboration capacitante (ECS en anglais pour Enabling Collaboration Situation) a été partiellement exposée en chapitre d'introduction générale à ce manuscrit ([Introduction Générale – Contexte](#)). Nous rentrons dans les détails de sa conceptualisation dans les lignes qui suivent.

Tout d'abord, son architecture. Une Situation de Collaboration Capacitante (ECS) est constituée de trois doctrines principales (fig.84) :

- Doctrine 1 : Apprendre une nouvelle manière de faire plus performante et maintenir cet apprentissage ;
- Doctrine 2 : Accroître les possibilités et les manières de faire disponibles dans les situations de collaboration ;
- Doctrine 3 : Ajuster les attributs du couple en fonction de la situation.

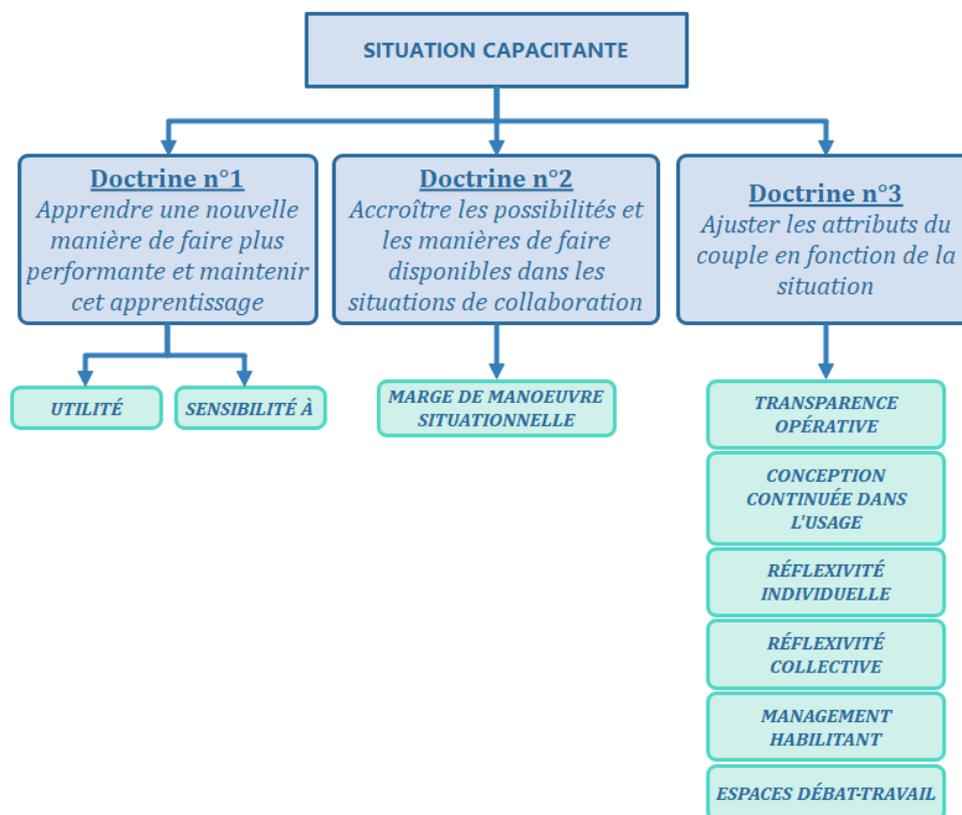


Figure 84: La classification des critères d'une situation capacitante. D'après (Compan et al., 2020).

I.2.1 Architecture conceptuelle de la première doctrine

Pour la première doctrine, Compan et alii (Compan et al., 2020) définissent la performance au poste, à l'usage du dispositif immersif et interactif, comme l'évaluation *écologique* (auprès de la situation réelle de travail) des critères de performance vis-à-vis des tâches prescrites. Selon les auteurs, la performance au poste de travail dépendra donc d'une part de l'utilité perçue par l'individu du système interactif, ainsi que l'expérience vécue par celui-ci à l'usage du dispositif.

Loup-Escande et Burkhardt (Loup-Escande and Burkhardt, 2019) considèrent l'utilité comme « le degré d'adéquation entre les buts poursuivis par les utilisateurs et les buts rendus possible par l'utilisation de l'artefact ». Ils ajoutent que l'utilité est une propriété située dans le sens que l'utilité n'est pas préexistante à la technologie implantée sur un poste de travail donné mais qu'elle résulte de l'interaction entre l'individu et le dispositif. Cette utilité n'est pas assurément acquise mais elle est « évolutive en ce sens qu'elle n'est ni complète ni définitive à chaque instant du processus de conception, mais change au cours du temps, en fonction de la façon dont changent les utilisateurs, l'outil et l'environnement ». Les auteurs distinguent deux sortes d'évaluation de la valeur de l'utilité pour un individu. La première concerne l'évaluation de « l'avantage relatif de l'artefact par rapport à l'existant et au contexte, en regard des multiples dimensions impliquées (coût, efficacité, utilisabilité de l'interface homme-machine) ». Loup-Escande et Burkhardt considèrent ce type d'évaluation comme objective et praticable en situation écologique. La seconde évaluation de l'utilité provient de l'identification subjective de l'utilité tels les facteurs socio-cognitifs, et/ou les représentations défavorables, qui ne traduit pas de l'utilité de la technologie via son expérience effective. Le modèle de Nielsen est de ces classifications qui permettent une évaluation objective de l'utilité de la technologie. Nielsen (Nielsen, 1994) postule que l'utilité d'un système dépend du caractère utilitaire théorique de ce système associé à l'utilisabilité de celui-ci. La décomposition de l'utilité dite pratique (dont les termes en langue française ont été hérité des travaux de Tricot et alii (Tricot et al., 2003)), est exposée en figure 85 (« Usefulness »). Elle est, dans cette même figure, composée de l'utilité théorique (« Utility ») et de l'utilisabilité (« Usability »).

Le schéma expose la notion d'acceptabilité d'un système par la constitution de deux acceptabilités, une première sociale, et une seconde pratique, dont la construction est faite par l'utilité pratique du système, elle-même constituée de l'utilisabilité et de l'utilité théorique, et de critères plus prosaïques comme le coût du système, sa fiabilité, sa compatibilité avec les autres systèmes, etc.

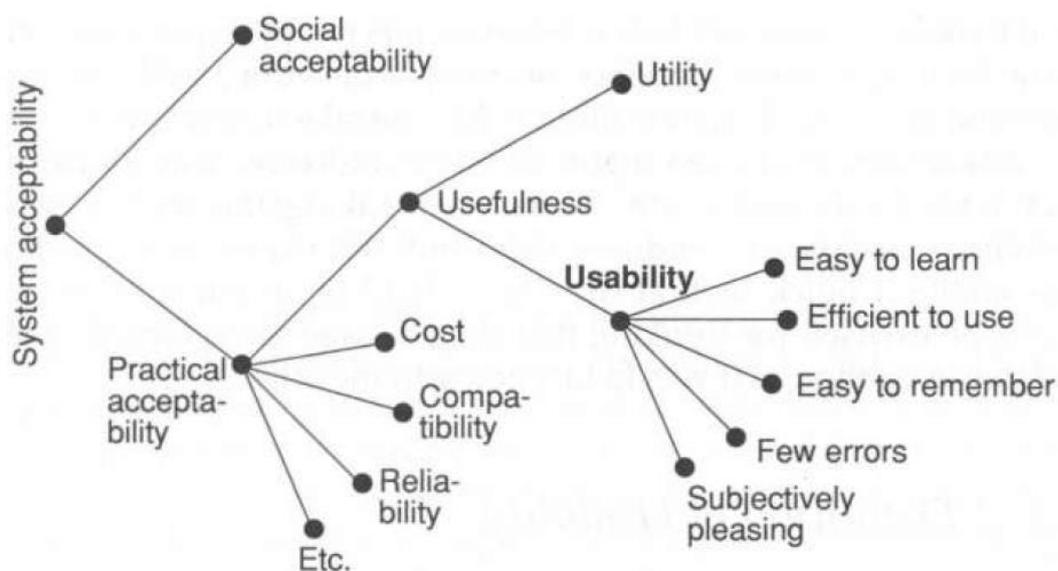


Figure 85: Une classification du triptyque acceptabilité-utilité-utilisabilité. D'après Nielsen (Nielsen, 1994).

Tricot et alii ([Tricot et al., 2003](#)) énoncent deux limites à cette classification quand on investigate le champ des interactions au sein d'un EIAH (entendez *Environnement Informatique d'Apprentissage Humain*) : 1/L'acceptabilité n'a pas d'effet sur l'utilisabilité ou sur l'utilité ; 2/l'utilisabilité qui est au cœur des préoccupations de Nielsen n'est pas une condition nécessaire et suffisante pour exprimer un avis sur l'usage. Ils ont donc effectué une recherche portant sur l'hypothèse que les trois dimensions sont corrélées et qu'il n'y a pas de relation de filiation entre celles-ci. Les résultats, visibles en figure 86, montrent que :

- Si l'utilité est bonne, l'utilisabilité peut être autant mauvaise que bonne ;
- Si l'utilité est mauvaise, l'utilisabilité est forcément mauvaise ;
- L'utilisabilité et l'acceptabilité ne sont pas corrélées ;
- L'utilité et l'acceptabilité sont en relation tautologique.

		ACCEPTABILITÉ			
		-		+	
		UTILISABILITÉ		UTILISABILITÉ	
		-	+	-	+
UTILITÉ	-	5	0	2	0
	+	4	3	0	1

Figure 86: Table de vérité résultante des recherches effectuées par Tricot et alii ([Tricot et al., 2003](#)) pour déterminer les relations entre les trois dimensions d'utilité, d'utilisabilité et d'acceptabilité.

Prospecter l'utilité au sein d'un environnement capacitant selon les critères définis par Compan et alii ([Tricot et al., 2003](#)) revient donc, à la lumière des explications fournies à l'instant d'évaluer par ailleurs l'utilisabilité du système, le critère d'acceptabilité revêtant un caractère optionnel et non décisif.

Deuxième notion contenue dans la première doctrine d'un ECS est l'expérience vécue par l'utilisateur à l'usage du dispositif. Ici, Compan et alii évoquent notamment les aspects hédoniques de l'expérience utilisateur, et les nomment les *affects*. Ceux-ci sont directement liés au modèle de l'expérience utilisateur (ou *User eXperience*) que nous évoquons dans le paragraphe III.2 ([partie DEUX – chapitre III – section 2](#)). L'intérêt au sein de la doctrine de l'ECS est de mesurer les caractères hédoniques de stimulation et d'identification, que Compan et alii relient à la « *sensibilité à* ». Celle-ci prend la forme d'une expérience « *de plaisir ou de peine* » qui permettrait de faire émerger une appétence à l'utilisation du dispositif selon ces caractères hédoniques. Nous revenons plus longuement sur la théorie inhérente aux méthodes de Design UX dans le chapitre III de cette même partie ([Partie DEUX, chapitre III, section 1](#)).

1.2.2 Architecture conceptuelle de la deuxième doctrine

La seconde doctrine d'une Situation Collaborative Capacitante (ECS) est la marge de manœuvre situationnelle à l'usage de la technologie (Coutarel et al., 2015). Directement lié au pouvoir d'agir, la marge de manœuvre définit un périmètre d'action dans laquelle peut évoluer l'opérateur : « *la marge de manœuvre situationnelle correspond à l'espace de régulation de la personne en activité de travail. [...] Cet espace de régulation varie selon deux paramètres principaux, soit d'une part, le cadre de travail (tâches, exigences, conditions et moyens offerts par le milieu de travail, environnement social) et d'autre part, les caractéristiques de la personne* ». Coutarel et alii considèrent par ailleurs que la marge de manœuvre situationnelle est corrélée au nombre de modes opératoires possibles en situation. Ainsi, moins la situation offrira de possibles séquençages d'agencement des tâches au sein du processus, moins l'individu aura de marge de manœuvre situationnelle.

1.2.3 Architecture conceptuelle de la troisième doctrine

La troisième et dernière doctrine est associée à l'ajustement de la dualité homme-machine au regard de l'évolution des situations dans le temps. Cette doctrine intègre les notions organisationnelles de réflexivité individuelle et collective, de management habilitant, ainsi que les espaces débat-travail déjà évoqués précédemment. A ceux-ci viennent se greffer les concepts de transparence opérative, de conception continuée dans l'usage et d'instrumentalisation.

La transparence opérative permet la compréhension minimale d'un système à l'usage par un individu. Rabardel (Rabardel, 1995) considère la transparence opérative comme « *les propriétés caractéristiques de l'instrument, pertinentes pour l'action de l'utilisateur, ainsi que la manière dont l'instrument les rend accessibles, compréhensibles, voire perceptibles pour l'utilisateur* ». Le système doit donc au travers de ce critère fournir les informations nécessaires à l'opérateur pour qu'il puisse effectuer, dans les meilleures conditions, la complétion des tâches qui lui sont prescrites. Rabardel évoque par ailleurs trois orientations (passé, présent, futur), à cette transparence. En effet, selon l'auteur, il faut considérer celle-ci à l'aune :

- Du passé, par la possibilité d'interprétation des situations du présent à l'aune de leur historique respective ;
- Du présent, via la compréhension en temps réel de la situation du système et de son fonctionnement interne ;
- Du futur, afin anticiper les comportements produits après avoir agi sur le système.

Le critère de conception continuée dans l'usage est aussi issu des travaux de Rabardel (Rabardel, 1995). Le chercheur esquisse un continuum entre les concepteurs du système et les utilisateurs. Cet ensemble « *conception-production-utilisation* » établit une communication directe entre les experts qui conçoivent le système selon une vision qu'ils ont de celui-ci tel qu'il devra se présenter, et la réalité du terrain perçue par les acteurs de la production. Vergnaud (Vergnaud, 2006) explicite cela par « *[...] la relation entre les concepteurs et les usagers : la conception se poursuit dans l'usage, et cela s'appuie sur le dialogue entre des personnes diversement situées dans le processus de conception-production-utilisation* ». Le dialogue peut partir du concepteur vers l'utilisateur à travers une analyse de l'utilisation faite par ce dernier. Mais cela peut avoir la direction inverse. L'utilisateur fournit alors les éléments nécessaires au concepteur pour qu'il puisse améliorer le système à l'aide des retours fournis par le ou les usagers du système sur la ligne de production. Cette mise à disposition est intimement liée aux moyens procurés par l'organisation dans le processus d'amélioration continue et elle fait donc écho aux critères annexes contenus dans cette même doctrine : réflexivité individuelle et collective, espaces débat-travail et management habilitant d'une part. Mais d'autre part, la conception continuée dans l'usage de l'opérateur vers le concepteur peut être mise en parallèle avec

les critères que nous énonçons au chapitre IV de la première partie de ce manuscrit ([partie UNE, chapitre IV, section 2](#)), les travaux de Nonaka et Takeuchi où les acteurs de la production peuvent améliorer les interactions qu'ils ont avec le système grâce à une remontée des savoirs tacites assimilés lors de la complétion de leurs tâches à l'aune de l'usage qu'ils font du système. La relation faite entre les opérateurs et les concepteurs relève de la modalité de conversion « *combinaison* » dans la spirale des connaissances de Nonaka et Takeuchi. La connaissance tacite générée est « *socialisée* » lors des espaces débat-travail puis « *externalisée* » via le processus de validation que nous fournissons en figure 81 du précédent chapitre. Enfin, la validation par la hiérarchie donne lieu à l'appropriation par les concepteurs de la « *bonne pratique* » qu'ils intègrent finalement au système (« *combinaison* ») pour qu'elle soit en bout de chaîne « *internalisée* » par tous les opérateurs, au travers de son éventuel usage en production.

Compan et alii ([Compan et al., 2020](#)) insèrent la notion d'instrumentalisation dans le concept plus large de conception continuée dans l'usage via ce qu'ils appellent « *l'ajustement des attributs du couple homme-machine dans le temps* ». L'instrumentalisation, notion contenue dans le concept plus large de conception continuée dans l'usage donc, provient de la relation qu'entretiennent l'homme et l'instrument dans le cadre de l'activité. Pour Rabardel ([Rabardel, 1995](#)), l'instrument est un artefact constituant le rôle de médiateur dans l'activité, mais il ne se réduit pas à cela. Rabardel évoque cette médiation comme la genèse instrumentale qui est une idée qui tient à la fois de l'objet et du sujet : « *L'instrument est une entité fondamentalement mixte, constituée, du côté de l'objet d'un artefact, d'une fraction, voire d'un ensemble d'artefacts matériels ou symboliques, et du côté du sujet d'organiseurs de l'activité que nous avons nommés par ailleurs les schèmes d'utilisation et qui comprennent des dimensions représentatives et opératoires* ». Rabardel considère deux dimensions dans sa genèse instrumentale : le processus d'instrumentation, orienté vers le sujet. Il concerne selon Alain Jean ([Jean, 2016](#)) « [...] *l'émergence et l'évolution des schèmes d'utilisation* ». Rabardel définit le processus d'instrumentation comme « *un processus d'apprentissage : les schèmes évoluent, se transforment, d'autres se créent, se développent et s'incorporent aux schèmes préexistants. L'utilisateur apprend et évolue et c'est au cours de ce processus d'instrumentation qu'il y a un processus de conceptualisation* ».

A l'inverse, le processus d'instrumentalisation est associé à « *l'émergence et à l'évolution des composantes artefacts de l'instrument : sélection, regroupement, production et institution de fonctions, détournements et catachrèses, attribution de propriétés, transformation de l'artefact (structure, fonctionnement, etc.) qui prolongent les créations et réalisations d'artefacts dont les limites sont, de ce fait, difficiles à déterminer* » ([Jean, 2016](#)). Finalement, l'instrumentalisation telle qu'elle se présente dans les écrits de Compan et alii ([Compan et al., 2020](#)) consiste en une appropriation des propriétés de l'instrument (le dispositif interactif en interaction) et en une modification possible de celles-ci au sein de l'interface. Le but étant de pouvoir effectuer une amélioration continue des éléments constitutifs à l'interaction au sein du couple homme-machine, d'où l'intégration de la notion d'instrumentalisation dans le concept de conception continuée dans l'usage par les auteurs.

I.2.4 Vers une corrélation des concepts de Knowledge Management, du capacitant et des différents types de HLI

Il est difficile de lier les différentes notions exposées dans les chapitres précédents, sur les différents types d'HLI d'apprentissage ([chapitre III, section 2 de la partie UNE](#)), les modalités de capture et de gestion de la connaissance ([chapitre IV, section 2 de la partie UNE](#)) et les critères du capacitant. Pourtant, il existe une corrélation entre les trois doctrines et les deux autres concepts (fig.87).

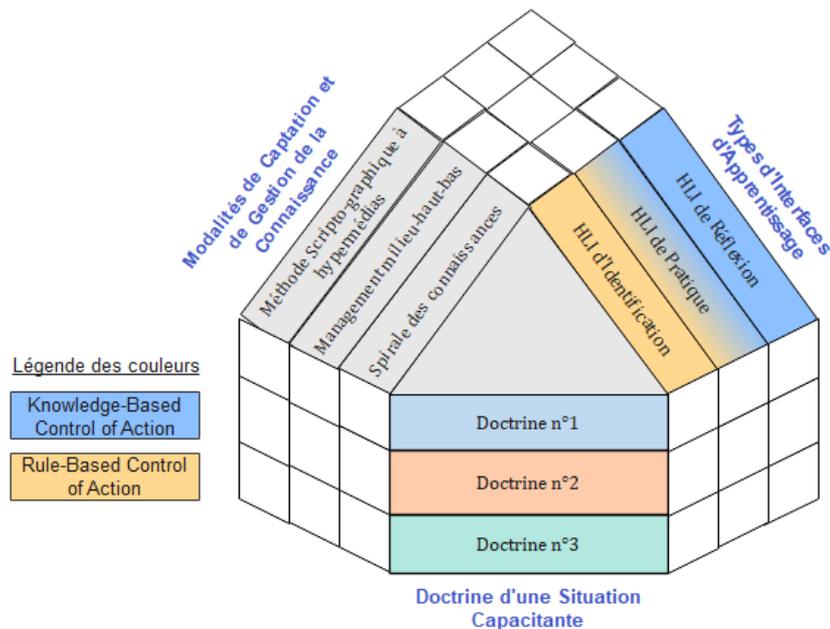


Figure 87: Corrélation entre les concepts de KM, HLI, et critères du capacitant.

En l'état, il n'est pas possible de générer des liens entre les doctrines du capacitant et les concepts connexes. Il faut effectuer un zoom sur les critères du capacitant pour pouvoir connecter les concepts entre eux. La figure 88 rend visible le déploiement des critères du capacitant par doctrine.

1.2.4.1 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la première doctrine du capacitant

La première doctrine du capacitant contient les critères d'utilité pratique et de *sensibilité* à. Ces deux critères caractérisant les interactions entre l'Homme et la Machine, l'intégralité des HLI doivent y répondre. En effet, il faut que chaque HLI puisse fournir à l'utilisateur, l'expérience utilisateur optimale, du point de l'utilisabilité et de l'utilité d'une part, des affects d'autre parts. Il y a donc une forte corrélation entre les critères de la première doctrine et toutes les HLI (fig.88).

Les critères d'utilisabilité et d'affects liés à l'utilisation d'une IHM nécessite, dans le cas où un individu souhaiterait partager un savoir tacite à autrui, de ne pas être contraint à la faveur d'un défaut de convivialité de l'interface d'explicitation du savoir tacite émergé. Les méthodes scripto-graphiques à hypermédias doivent revêtir alors des caractères pragmatiques et hédoniques leur permettant une bonne ergonomie d'utilisation. Cette méthode de transmission du savoir est corrélée aux deux critères du capacitant.

1.2.4.2 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la seconde doctrine du capacitant

Selon nos hypothèses, la marge de manœuvre situationnelle est nécessaire pour toutes les HLI car il a été défini précédemment que la MMS correspond à un espace de régulation, sur la base des caractéristiques de la personne ou dans le cadre de travail. L'hypothèse que nous faisons est que l'importance de cet espace de régulation sera d'autant plus importante que l'utilisateur sera expérimenté. Il existe une corrélation forte entre le critère MMS et toutes les HLI (fig.88).

Dans le cas de la gestion et de la capture des connaissances en entreprise, une MMS permet à l'utilisateur de tester des cheminements alternatifs de résolution de ses problématiques. Ce savoir obtenu au cours de ces expériences permet la capitalisation d'un savoir qu'il est utile de pouvoir transmettre à la communauté. De ce fait, nous faisons l'hypothèse que la MMS est très liée aux critères du KM (*Knowledge Management*).

1.2.4.3 Corrélation des concepts de KM et des HLI par rapport aux critères de la troisième doctrine du capacitant

Le critère de transparence opérative nécessite d'être pris en compte dans l'intégralité des trois types de HLI. En effet, la perception et la compréhension des informations contenues dans l'IHM est nécessaire dans tous les cas d'interactions entre l'Homme et la machine. Ce critère est fortement lié aux trois types de HLI (fig.88).

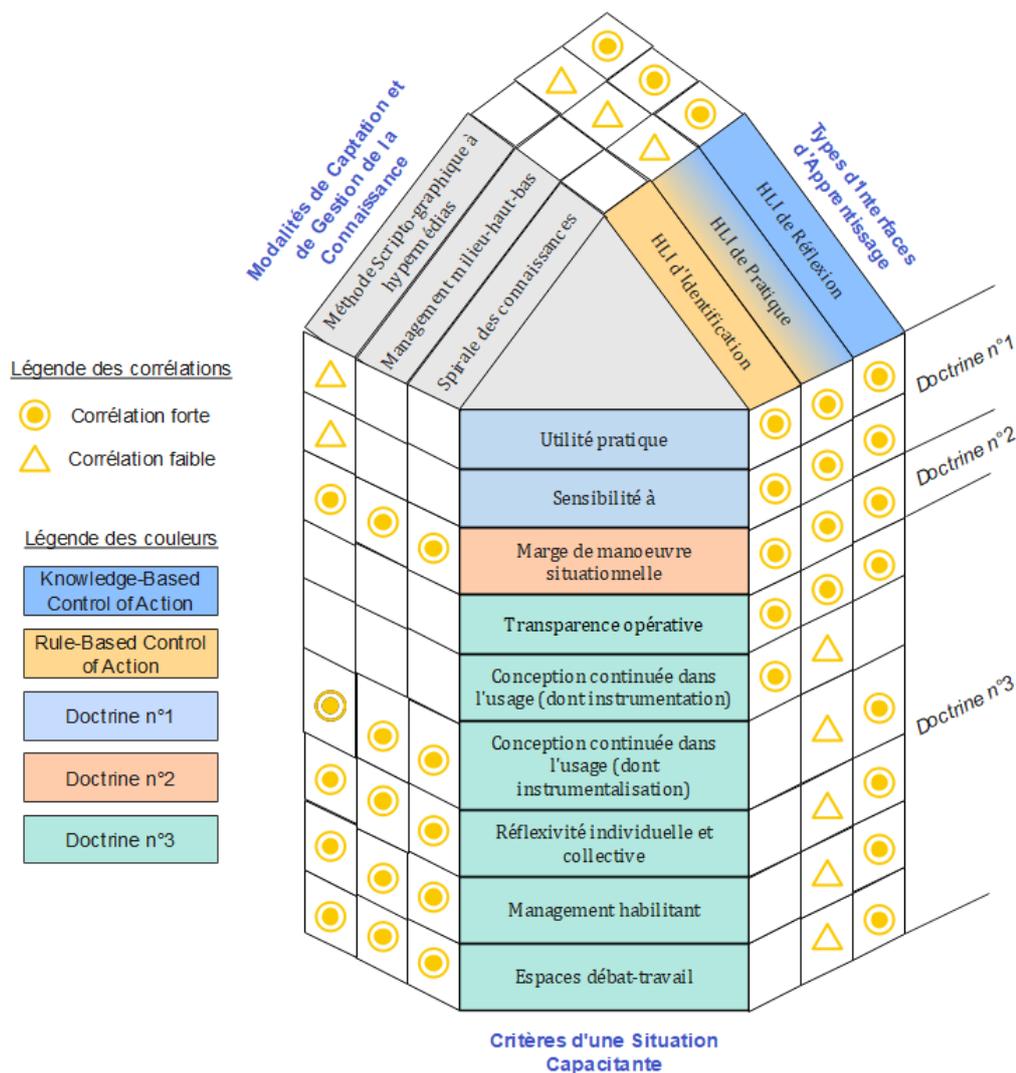


Figure 88: Les concepts explicités dans les chapitres III et IV associés aux critères du capacitant de conception continuée dans l'usage et d'instrumentalisation.

La jonction de la notion d'instrumentalisation (et de ses deux processus associés : instrumentation et instrumentalisation) avec les deux concepts de KM et de HLI est opérée de la manière suivante (fig.88) : Le processus d'instrumentation visant à acquérir les schèmes d'utilisation de l'instrument à travers un apprentissage. Le parallèle peut être fait avec les IHMs d'Identification et de Pratique proposée par Koper. Le processus

d'instrumentalisation vise à faire évoluer l'instrument. Ici, nous faisons le parallèle avec l'IHM de Réflexion dans laquelle l'utilisateur crée des utilisations différentes de celles proposées par l'assimilation d'un savoir tacite qu'il souhaite partager. Secondement, le partage du savoir tacite généré peut être fait via le processus de partage basé sur la méthode scripto-graphique à hypermédias dans lequel l'interface est remaniée à des fins d'amélioration par l'utilisateur qui a détecté un moyen de faire différemment (mieux, plus rapidement, etc.).

Finalement, le processus d'instrumentation fait référence à la méthode *Rule- Based Control of Action* (fig.88) dans lequel l'opérateur évolue dans le cadre de situations usuelles. Les IHMs associées sont de types Identification et Pratique. L'utilisateur apprend les schèmes d'utilisation de l'instrument afin de maîtriser le processus de complétion de la tâche (HLI Identification), puis il réutilise l'instrument sur le poste de travail en production si toutefois la situation l'exigeait (oubli de la situation usuelle par exemple) via l'IHM de Pratique. Les concepteurs peuvent opérer des améliorations continues via l'analyse de l'usage par les salariés dans ces cas de figure.

Le processus d'instrumentalisation est associé à la méthode de *Knowledge- Based Control of Action* (fig.88) car l'utilisateur, fort de son expérience sur le poste et de sa connaissance des interactions qu'il a avec l'instrument peut fournir au concepteur des éléments d'amélioration. L'IHM de Réflexion associée aux critères organisationnels de la troisième doctrine (réflexivité, espaces débat-travail et management habilitant) et à la méthode de communication scripto- graphique à hypermédias, fournit un cadre idéal d'expression de l'opérateur pour améliorer son environnement de travail.

Les critères de réflexivité individuelle et collective, d'espace débat-travail et de management habilitant, ont un intérêt très grand dans le cas de la HLI de Réflexion car c'est dans ce cas, que l'opérateur très expérimenté sur son poste de travail et dans sa connaissance des interactions avec le dispositif interactif peut exprimer des souhaits d'évolution des situations de collaboration Homme-Machine. L'organisation industrielle doit donc permettre d'aider à faire émerger les possibilités d'évolution du couple Homme-Machine sur le poste de travail. Ce constat est vrai aussi pour les cas de l'utilisation de HLI de Pratique car l'utilisateur peut avoir de bonnes idées même si son expérience n'est pas aussi importante. Il y a un lien fort entre ces critères organisationnels et la HLI de Réflexion et une corrélation faible mais non négligeable à prendre en compte pour le cas de la HLI de Pratique (fig.88). Par ailleurs, les méthodes managériales et de capture et de gestion de la connaissance ont été pensées par Nonaka et Takeuchi pour permettre l'expression des salariés très expérimentés. Les critères organisationnels du capacitant (réflexivité, management habilitant et espaces débat-travail) ont un lien fort avec les concepts du Knowledge Management tout comme les HLI de Réflexion et de Pratique.

Toutes ces corrélations effectuées entre les différents concepts et rendus visibles dans la figure 88 n'ont pour l'instant qu'un caractère hypothétique. Les corrélations doivent être prouvées par l'étude expérimentale. A ce titre, les pastilles marquant les éventuels liens sont marquées en jaune dans la figure 88. Armés du bagage technique et scientifique sur lesquels nous pouvons dorénavant nous appuyer, nous définissons une méthodologie de travail fondée sur les différents verrous à lever pour créer une heuristique embrassant la globalité des points énoncés précédemment et élaborer une stratégie de validation de tout ou partie des critères de définition d'une situation de collaboration capacitante (ECS) à l'usage d'une technologie de réalité augmentée (RA) dans le cadre de l'industrie du futur.

Le chapitre II de cette partie est consacré à la définition des objectifs à atteindre : verrous scientifiques, technologiques et méthodologiques à lever en section 1, puis définition de nos questions de recherche en section 2. Enfin, le chapitre III de cette partie est consacré aux moyens déployés pour parvenir à la complétion des tâches prescrites de recherche. En section 1, nous introduisons quelques méthodes de design des interfaces, puis, en section 2, nous établissons les moyens de validation empirique de notre méthodologie à l'aune de la mesure des critères du capacitant lors de l'usage d'une interface homme-machine.

Chapitre II : Les objectifs à atteindre : Défis à relever et hypothèses de recherche

Section 1 Verrous méthodologiques, techniques et scientifiques à lever

L'État de l'Art effectué notamment sur la classification des technologies de réalité augmentée ([Beaudouin-Lafon, 2000](#); [Benford et al., 2005](#); [Dubois et al., 2003, 1999](#); [Dubois and Nigay, 2000](#); [Havard and Baudry, 2019](#); [Jacob et al., 2008](#); [Normand et al., 2012a](#); [Syberfeldt et al., 2017](#)) et de leur matérialité au sein du continuum de la virtualité ([Mann, 1994](#); [Milgram and Kishino, 1994](#); [Kress and Cummings, 2017](#); [Speicher et al., 2019](#)) montre l'hétérogénéité des représentations que les chercheurs peuvent avoir entre eux. Les quelques publications que nous exposons sur l'impact des technologies, tant du point de vue de leur architecture que du point de vue des composants dont elles sont parées sont autant d'éléments qui semblent avoir un impact sur l'expérience de travail et d'apprentissage perçue par les individus à l'usage ([Funk et al., 2017](#); [Blanco-Novoa et al., 2018](#); [Bode, 2019](#); [Pusch and Noël, 2019](#); [Yan et al., 2019](#); [Zhuang et al., 2019](#); [Rieder et al., 2021](#)). Enfin, les interfaces homme-machine, de par leur conception, leur architecture, leur fonctionnement mais aussi via les interactions contenues et les métaphores d'interaction ([I. Poupyrev et al., 1998](#); [Bowman and Hodges, 1999](#); [Jung et al., 2014](#); [Papadopoulos et al., 2021](#)) laissent présager d'autant d'hétérogénéité d'usage et de performance à l'usage et donc d'impact que ne les laissent supposer les éléments architecturaux et de fonctionnement matériels des dispositifs interactifs.

Pourtant, malgré ces incertitudes de tous bords, les dispositifs immersifs et interactifs que symbolisent, entre autres, les technologies de RA, semblent prometteuses en termes de performances, et de flexibilité de l'appareil de production d'une part, mais aussi d'autonomie et de responsabilisation accrue pour les opérateurs d'autre part, éléments requis pour l'obtention d'une usine du futur ([La Fabrique de l'Industrie, 2017](#); [Alliance Industrie du Futur, 2018](#); [Julien and Martin, 2018](#); [Oztemel and Gursev, 2020](#)). Sans doute, l'émergence de la technologie impose en premier lieu de lever des enjeux techniques. Les prospections effectuées ([Grubert et al., 2018](#); [Palmarini et al., 2018](#); [Bottani and Vignali, 2019](#); [Egger and Masood, 2020](#)) depuis le début des années 2000 confirment un intérêt basé sur les éléments techniques de la RA (suivi et recalage, rendu des objets virtuels, intégration des données numériques, champ de vision, etc.) et bien moindre sur le Facteur Humain (acceptation utilisateur, ergonomie des interfaces, etc.) alors que certaines études montrent clairement que les industriels sont conscients de l'intérêt de l'acceptation, de l'ergonomie des dispositifs, et de l'utilisabilité des interfaces pour la réussite de l'implantation de telles technologies au sein de leurs usines ([Dey et al., 2018](#); [Masood and Egger, 2019, 2020](#)).

Par ailleurs, évoluant en un silo parallèle dont il ne semble pas qu'il y ait eu, pour le moment, de connexion notable, les développements de concepts d'environnements capacitants ([Falzon, 2005](#)), de développement du pouvoir d'agir ([Sen, 1999](#)) des individus sur les chaînes de production, et l'émergence de la notion de situation de collaboration capacitante à l'usage de technologies 4.0 ([Compan et al., 2020](#)). Ces développements semblent pouvoir créer un gué dont les chercheurs peuvent se saisir afin de développer des concepts transversaux, à mi-chemin entre les mondes de l'ergonomie de l'activité et celui des technologues qui sont pour l'heure relativement dissonants dans leurs discours respectifs.

Le projet ANR Collaboration 4.0 auquel nous participons, s'appuie sur les compétences des laboratoires ACTé pour l'ergonomie et de G-SCOP pour le génie industriel afin de promouvoir le couple Homme-Machine en situation de collaboration industrielle. Ce faisant le document de soumission du projet porté à l'ANR objective le souhait de lever plusieurs verrous : 1/scientifiques, via la conception et la justification des performances, de situations de collaboration homme-machine capacitantes, 2/technologiques, par

l'intermédiaire du développement de systèmes adaptatifs dont pourrait se saisir l'Homme à des fins de performances accrues certes, mais aussi via un apprentissage continu dont la technologie serait le vecteur. Vecteur dont la norme pourrait être considérée à l'aune des critères du capacitant et des trois doctrines échafaudées, 3/méthodologiques, par la justification du choix de la technologie appropriée et par la validation de la collaboration entre l'Humain et la machine via un protocole d'expérimentation.

Les objectifs exposés par le projet ANR nécessitent de penser la conception de l'environnement de collaboration. Pour cela, il faut caractériser les activités collaboratives capacitantes Homme-Machine sur des postes de travail 4.0 en fonction des technologies mises en œuvre. Ce travail de caractérisation est élaboré par le laboratoire ACTé qui a pour objet de développer les doctrines et les critères associés dont nous devons nous servir pour évaluer et mesurer le degré d'acceptation par les usagers. Il nous faut corrélérer les critères du capacitant tels que définis en chapitre premier de cette partie avec les spécificités des systèmes de RA, tant du point de vue matériels que logiciels. La traduction des critères ergonomiques du capacitant en caractéristiques technologiques est fondamental pour engager les travaux de développement d'une situation de collaboration Homme-Machine future. Cette collaboration ne pourra être implantable en usine du futur qu'à l'aune du respect des performances du couple Homme-Machine car on ne sait pas justifier l'utilité de l'équipement 4.0 et la performance du couple Homme-Equipement dans une situation de travail collaborative industrielle 4.0 globale. Et quand il y a utilité et performance, il faut être capable de concevoir l'activité collaborative équipée qui garantit l'obtention de la performance. Les interactions entre les entités, humaine, organisationnelle et technologique, sont au cœur de l'interrogation qui vise à mesurer l'usage qui sera fait de la technologie 4.0 par l'individu. Ainsi, la problématique centrale est celle des usages et de l'organisation industrielle à mettre en place pour tirer parti de tout le potentiel des équipements numériques tout en développant en continu les capacités du collaborateur. Or, pour permettre une évaluation des usages, il nous faut construire une situation d'usage d'un dispositifs immersif et interactif et évaluer celui-ci via un cadre conceptuel de mesure de la performance via la modélisation des situations de travail collaboratives Homme-Machine performantes et la définition d'un nouveau cadre conceptuel caractérisant les indicateurs de performance. Par ailleurs, une méthodologie de conception des activités de collaboration doit être élaborée.

Les grands axes de travail de recherche que nous venons d'étayer, depuis les analyses sans doute trop technocentrées des usages qui sont faits des dispositifs, à l'émergence de nouveaux concepts ergonomiques tels que le capacitant, nous conduisent à envisager un travail de mise en lumière de l'usage d'un dispositif immersif et interactif (un appareil de RA), en prenant en compte les doctrines élaborées d'une situation de collaboration capacitante (ECS).

Nous définissons donc cinq tâches principales déclinées par la figure 89. Nous devons faire corrélérer les critères de caractérisation d'une situation de collaboration capacitante définis par le laboratoire ACTé ([Compan et al., 2020](#)) avec nos classifications des technologies de RA (**tâche 1**), et les spécificités techniques et technologiques qui leurs sont associées, tant du point de vue matériel que logiciel. Cela présuppose que ces classifications doivent avoir été préalablement effectuées. Le processus itératif de cette première étape naît des modifications opérées par ACTé tout au long du processus.

La méthode de collaboration est itérée par les corrélations faites dans l'étape de corrélation. On ajuste alors la méthode construite aux critères retenus par ACTé et aux parallèles faits avec les technologies de RA (**tâche 2**). Cette méthode doit permettre de définir un cadre de choix des technologies et de construction d'une collaboration future entre l'Homme et la Machine.

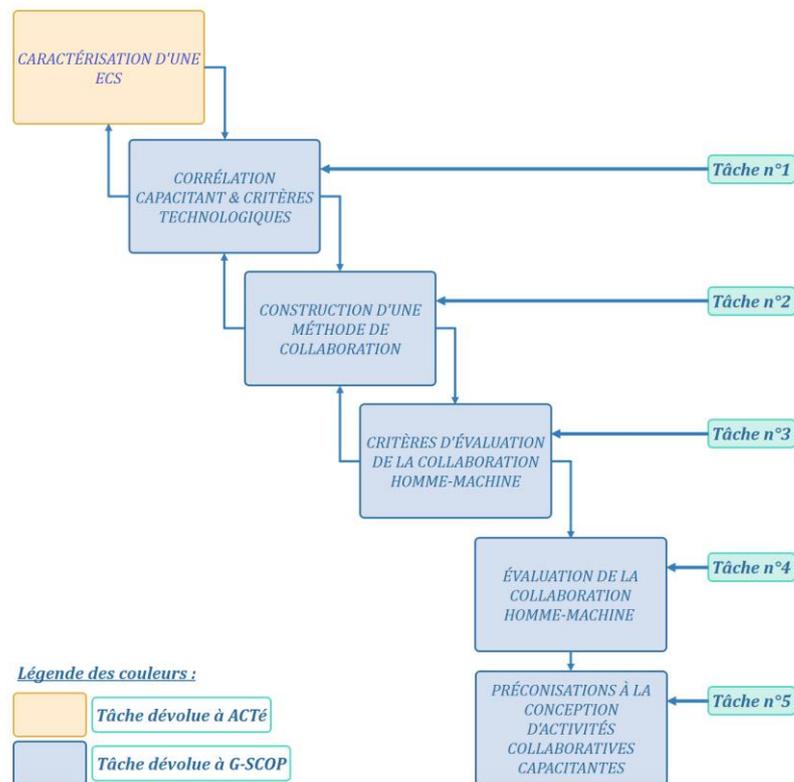


Figure 89: Les tâches de recherches dévolues à G-SCOP au sein du projet ANR Collaboration 4.0.

La détermination des critères d'évaluation émerge de la méthode de collaboration. Celle-ci doit permettre de dégager un cadre dans lequel évoluera l'individu durant l'utilisation du dispositif de RA (**tâche 3**). Déterminer un scénario d'usage et de mesure de celui-ci est l'objet de notre troisième tâche de recherche qui aboutit par l'évaluation proprement dite de l'usage sur une situation de travail de collaboration Homme-Machine industrielle (**tâche 4**). De cette évaluation de la collaboration Homme-Machine germe des préconisations de conception d'activités collaboratives capacitanes pour l'industrie du futur (**tâche 5**).

Section 2 Hypothèses de recherche au regard du séquençage des tâches

La construction du graphe des tâches qui nous sont dévolues, tel qu'explicité en figure 89 permet désormais de poser les questions de recherches inhérentes à la complétion de celles-ci. Celles-ci découlent toutes de la question de recherche principale suivante :

QP_{principale} : Quelle heuristique permet de produire un lien entre les technologies de réalité augmentée, les caractéristiques des processus et les critères du capacitant, en vue de favoriser la conception de situations de collaboration Homme-Machine, dans le but d'accroître les capacités d'actions et les compétences des individus, dans le cadre de l'industrie du futur ?

La réponse à la question de recherche principale est étudiée à la lumière de la rédaction d'interrogations de recherches partielles afin de répondre au fur et à mesure aux tâches prescrites que nous évoquons dans la section précédente. S'agissant de la tâche prescrite n°1, l'analyse faite des critères du capacitant élaborés par le laboratoire ACTé, en parallèle

des travaux de prospection dans la Littérature sur les technologies de RA d'une part, et les Interfaces Homme- Machine, d'autre part, donnent lieu à la rédaction de la question de recherches suivante :

QR1 : Quel substrat scientifique permet de faire corrélérer les critères techniques et technologiques des technologies de RA avec les critères d'une ECS inspirés de l'ergonomie de l'activité ?

La question QR1 donne lieu à la rédaction de questions de recherche détaillées (fig.90) :

Sur les technologies de Réalité Augmentée :

- **QR1.1** : Quelle définition est faite des différents modèles conceptuels mentionnés dans les continuums de la virtualité ?
- **QR1.2** : Quelles sont les différentes architectures de Réalité Augmentée existantes ?
- **QR1.3** : Quelles sont les spécificités techniques matérielles et logicielles des dispositifs de Réalité Augmentée ?

Sur les Interfaces Homme-Machine :

- **QR1.4** : Quels sont les différents modèles conceptuels d'Interfaces homme-Machine existantes ?
- **QR1.5** : Quelles sont leurs caractéristiques ?

Sur les critères de définition d'une Situation de Collaboration Capacitante (ECS) :

- **QR1.6** : Quels critères du capacitant peuvent-être liés à la caractérisation faite des technologies de RA ?
- **QR1.7** : Quels critères du capacitant peuvent-être liés à la caractérisation faite des Interfaces Homme-Machine ?

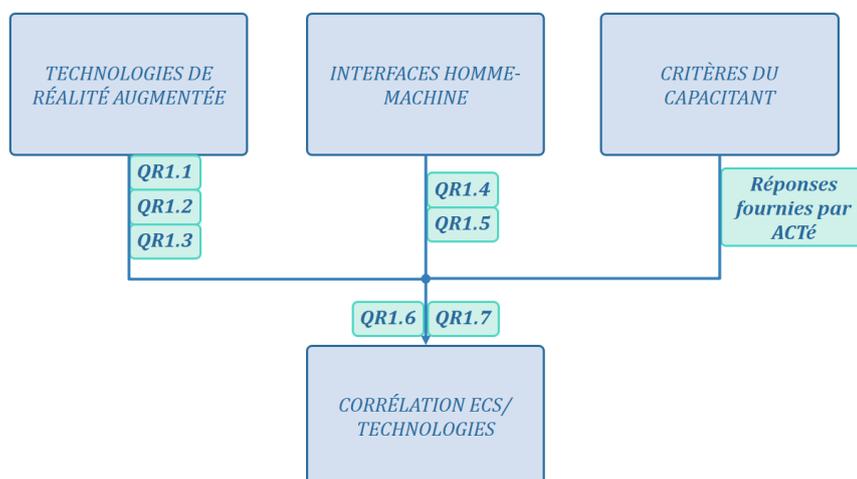


Figure 90: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°1.

Les questions de recherche QR1.1 à QR1.5 ont déjà fait l'objet de réponses, celles-ci étant liées à l'établissement d'un État de l'Art résultant d'une prospection dans la Littérature scientifique. Précisément, les questions de recherche QR1.1, QR1.2 et QR1.3 ont été résolues au chapitre II de la partie UNE de ce manuscrit quand les questions QR1.4 et QR1.5 ont été solutionnées au chapitre III de la partie UNE. Enfin, les critères du capacitant

résultants des travaux du laboratoire ACTé ont fait l'objet d'une définition complète dans le chapitre premier de la partie DEUX de ce manuscrit.

La méthode de construction d'une collaboration Homme-Machine capacitante (ECS) est basée sur la volonté de pouvoir faire émerger les dispositifs de RA les plus pertinents en regard des caractéristiques du poste de travail où l'on souhaite adjoindre la technologie 4.0. Par ailleurs, la méthode doit permettre la prise en compte des interacteurs, de leur nature, de leur comportement, et des métaphores d'interaction associées, dans les critères de choix du dispositif et leur pertinence pour la situation de collaboration future. Cette seconde tâche, met en exergue la question de recherche suivante (fig.91) :

QR2 : Quel moyen méthodologique peut rendre effectif le choix d'un dispositif de RA en regard de la situation de collaboration Homme-Machine modélisée par les concepteurs dans l'industrie ?

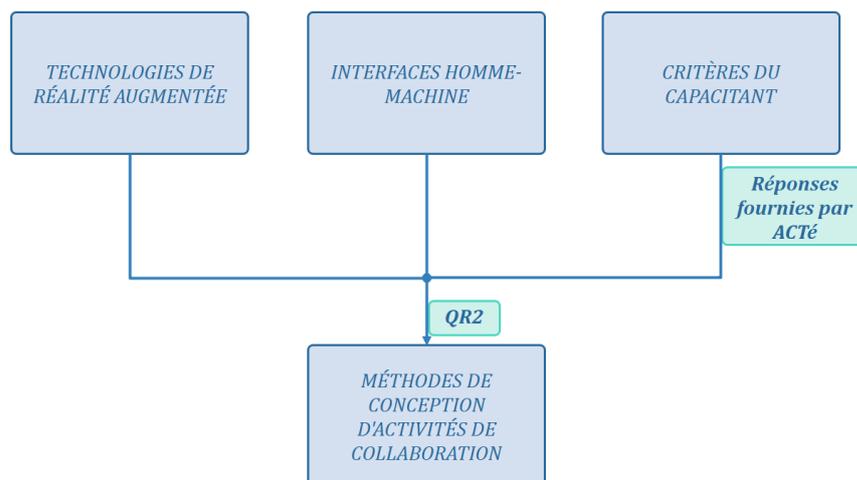


Figure 91: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°2.

La **tâche n°3** de construction des critères d'évaluation de la collaboration Homme-Machine œuvre à définir les variables qualitatives et quantitatives issues de la modélisation d'une situation de collaboration Homme-Machine Capacitante industrielle. La question de recherche associée à cette tâche peut se résumer comme suit :

QR3 : Quels outils de mesure de la collaboration Homme-Machine permettent d'évaluer une situation de collaboration capacitante (ECS) ?

Les questions de recherche inhérentes à QR3 sont (fig.92) :

Sur la modélisation d'une situation de collaboration Homme-Machine :

- **QR3.1** : Quelle modélisation d'une situation de collaboration Homme-Machine permettrait de justifier tout ou partie des critères du capacitant présents dans les trois doctrines constituant une ECS ?

Sur l'évaluation de la situation de collaboration :

- **QR3.2** : Quels pourraient-êtré les outils de mesure quantitatifs adéquats permettant de justifier de l'utilité de notre situation de collaboration ?
- **QR3.3** : Quels sont les critères et les outils quantitatifs qui permettraient de mesurer les performances de la situation de collaboration ?
- **QR3.4** : Quel outil d'évaluation qualitatif permettrait d'apprécier l'expérience utilisateur vécue par l'individu lors de la situation de collaboration ?

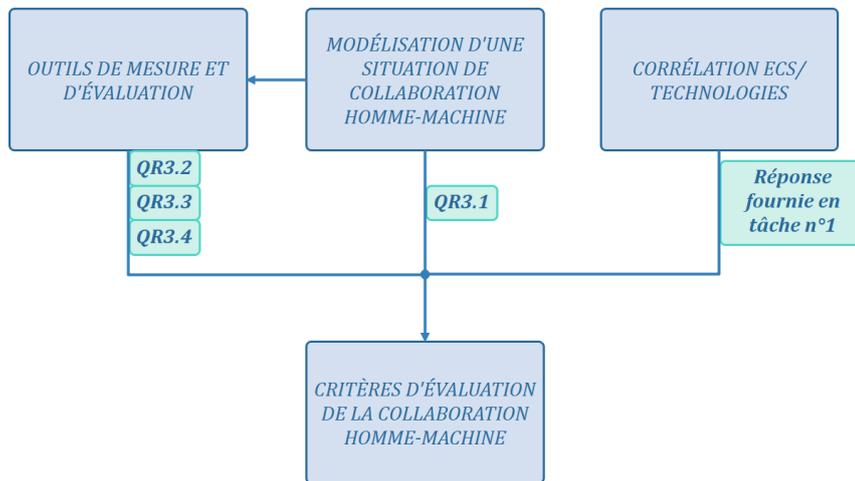


Figure 92: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°3.

L'élaboration des critères de mesure faite en tâche 3 permet dorénavant de procéder à l'évaluation proprement dite de la situation de collaboration Homme-Machine via un protocole élaboré en amont. Les questions de recherche que nous souhaitons mettre en exergue dans le cadre d'une expérimentation (**tâche n°4**) sont celles-ci (fig.93) :

QR4 : Quel protocole d'évaluation de la collaboration Homme- Machine permet de justifier la pertinence des éléments technologiques et ergonomiques dans une situation de collaboration capacitante ?

Du point de vue des critères définissant une ECS :

- **QR4.1** : La mise en perspective des critères du capacitant, au travers des critères de choix techniques retenus pour élaborer une situation de collaboration capacitante, confirme-t-elle la validité de ceux-ci ?

Du point de vue des technologies de RA :

- **QR4.2** : L'évaluation de l'ECS faite, à l'aune des critères de choix matériels retenus pour choisir une technologie de RA, confirme-t-elle la pertinence de ces critères de choix matériels ?
- **QR4.3** : L'évaluation de l'ECS faite, à l'aune des critères de choix interactifs retenus pour choisir une technologie de RA, confirme-t-elle la pertinence de ces critères de choix interactifs ?

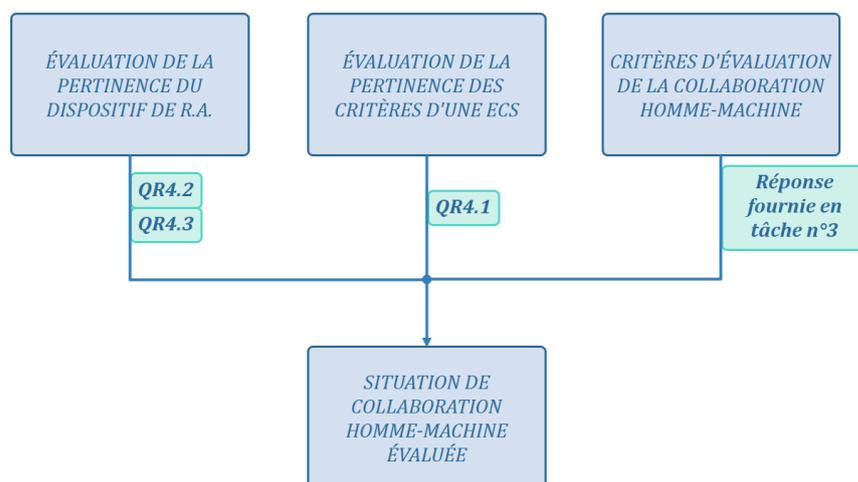


Figure 93: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°4.

L'évaluation d'une situation de collaboration capacitante sur un cas industriel devrait nous permettre, en plus de la méthode de choix d'un dispositif interactif à l'aune de critères de choix préalablement effectués, de rédiger quelques préconisations à l'attention des décideurs et des concepteurs industriels (**tâche n°5**) sur la base des réflexions suivantes (fig.94) :

QR5 : Quelles préconisations peuvent être exprimées sur la base des éléments de l'étude expérimentale réalisée et de l'heuristique élaborée ?

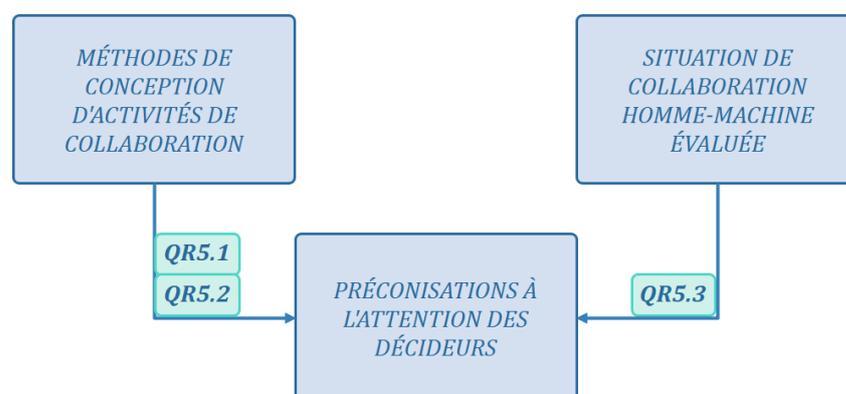


Figure 94: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°5.

- **QR5.1** : Quelles préconisations peuvent être faites sur la base de la méthode de choix d'un dispositif de RA eu égard à ses caractéristiques technologiques ?
- **QR5.2** : Quelles préconisations peuvent être faites sur la base de la méthode de choix d'un dispositif de RA par rapport à la prise en compte des interacteurs souhaités par les concepteurs ?
- **QR5.3** : Quelles préconisations peuvent être faites sur la base de l'évaluation de la situation de collaboration capacitante effectuée sur le poste de travail industriel modélisé ?

La réponse apportée à l'ensemble des questions de recherche des tâches précédentes devra donner lieu à la réponse que nous pourrons alors apporter à la question de recherche principale que nous réexposons ci-dessous :

QP_{principale} : Quelle heuristique permet de produire un lien entre les technologies de Réalité augmentée, les caractéristiques des processus et les critères du capacitants, en vue de favoriser la conception de situations de collaboration Homme-Machine, dans le but d'accroître les capacités d'actions et les compétences des individus, dans le cadre de l'industrie du futur ?

Les objectifs déterminés au sein d'une démarche itérative qui se nourrit des apports de l'ergonomie de l'activité, résultat du travail du laboratoire ACTé, nécessitent une analyse des différents concepts que nous faisons émerger au cours des chapitres précédents à la lumière de la méthode de recherche que nous exposons. Il faut en premier lieu, faire corrélérer les technologies de RA et les critères du capacitant (**tâche n°1**) pour pouvoir comprendre comment nous pourrons évaluer ceux-ci (**tâche n°3**) lors de notre évaluation de la situation de collaboration (**tâche n°4**). La construction de l'heuristique (**tâche n°2**) est fortement influencée par les méthodes usitées pour concevoir des interactions entre l'Homme et la Machine. Ces méthodes fournissent un cadre et de multiples outils permettant de prendre en considération l'ensemble des éléments nécessaires à l'érection d'interfaces robustes et de moyens fiables d'évaluation des situations de collaboration. Il nous faudra nous appuyer sur ces méthodes et motiver le choix de celles-ci pour la construction de l'heuristique.

Le chapitre suivant brosse justement l'une des méthodes de conception d'interfaces utilisateurs. Nous évoquons alors la méthode de Design UX, utile pour fournir un cadre cohérent utile à la construction des interactions Homme-Machine et qui donne par ailleurs nombre d'outils pour évaluer les différentes dimensions de l'expérience utilisateur à travers la mesure de l'usage fait du dispositif interactif par l'individu.

Chapitre III : Les moyens pour y parvenir : Méthodologie de notre travail de recherche

Section 1 Une méthode pour coupler processus, technologies et les critères d'une situation de collaboration capacitante

Le [chapitre III de la partie UNE](#) de ce manuscrit évoque quelques moyens de validation des IHMs empiriques notamment le concept de conception centrée sur l'utilisateur (ou CCU) développé en 1986 par Norman et Draper ([Norman and Draper, 1986](#)). La norme ISO 9241-210 ([International Organization for Standardization, 2010](#)) découle des travaux des deux chercheurs. Celle-ci attire l'attention des concepteurs sur le caractère fondamental que revêt l'intérêt de concevoir *pour* et *avec* les usagers finaux du dispositif, ici, un dispositif interactif. Par ailleurs, les auteurs insistent sur l'intérêt d'analyser l'usage qui est fait du dispositif et ce, dès le début des activités de conception. Or, de l'usage qui est fait par l'individu naît une expérience qu'il aura vécu. Cette expérience ne se résume plus en un terme unique, d'utilisabilité. L'expérience est au carrefour de plusieurs modalités de perception humaine, pragmatiques et émotionnelles, nées de l'usage ou de l'anticipation de l'usage d'un individu sur un produit, un système ou un service. Alben ([Alben, 1996](#)) définit l'expérience ressentie par l'utilisateur comme : « *tous les aspects liés à la manière dont les gens utilisent un produit interactif : la sensation du produit dans leurs 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'utilisent* ». De cette expérience surgit l'expression d'expérience utilisateur (ou UX pour *User eXperience* en anglais). Pour Lallemand et Gronier ([Lallemand and Gronier, 2018](#)), une « *expérience utilisateur (UX) est une forme spécifique d'expérience humaine qui naît de l'interaction avec une technologie, un produit ou un service. Le design UX a pour objectif de rendre cette expérience optimale en la pensant avant le produit* ».

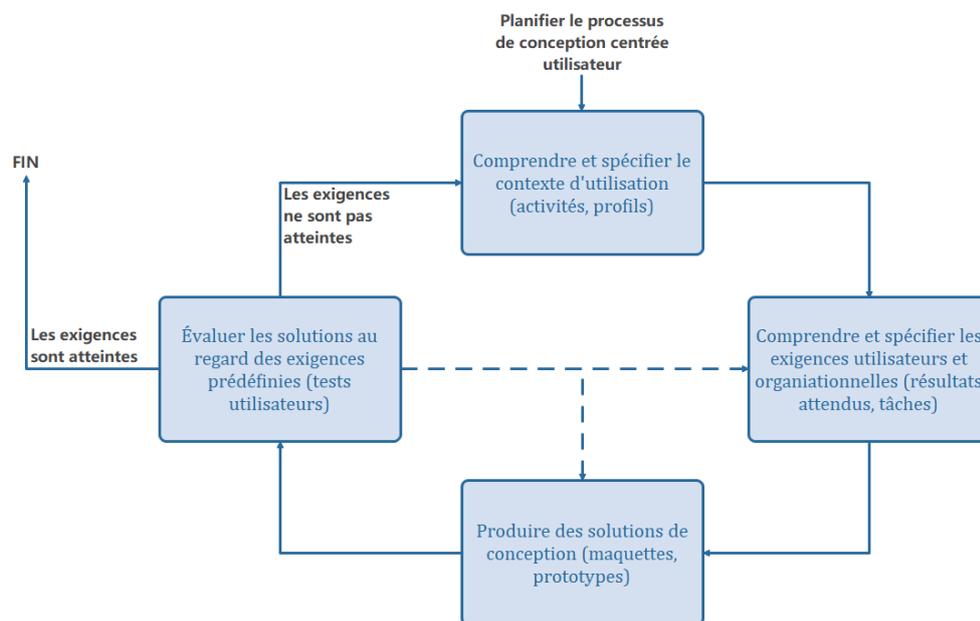


Figure 95: Méthode de Design UX globale. D'après ([Lallemand and Gronier, 2018](#)).

Que ce soit la norme ISO 9241-210, ou les écrits de Norman et Draper ([Norman and Draper, 1986](#)) ou Lallemand et Gronier ([Lallemand and Gronier, 2018](#)), tous s'accordent pour définir le processus de conception d'une UX comme un processus itératif (fig.95):

- De spécification du contexte d'utilisation ;

- De spécification des exigences utilisateurs et organisationnelles ;
- De production des solutions de conception via le développement de prototypes ou de maquettes ;
- D'évaluation des solutions par l'intermédiaire de tests utilisateurs.

Selon Hassenzahl et Tractinsky (**Hassenzahl and Tractinsky, 2006**), l'UX est définie comme : « *une conséquence de l'état interne de l'utilisateur (prédispositions, attentes, besoins, motivation, humeur, etc.), des caractéristiques du système conçu (par exemple, la complexité, l'objectif, la facilité d'utilisation, la fonctionnalité, etc.) et du contexte (ou l'environnement) dans lequel l'interaction se produit (par exemple, le cadre organisationnel/social, la signification de l'activité, le caractère volontaire de l'utilisation, etc.)* »²⁵.

III.1.1 Deux modèles de l'expérience utilisateur

III.1.1.1 Le modèle UX d'Hassenzahl

Le modèle UX de Hassenzahl (fig.96) observe que les intentions de conception et d'usage introduites par le concepteur peuvent différer à l'usage par l'utilisateur. Ainsi, le concepteur donne au produit un certain nombre de caractéristiques : contenu, fonctionnalités, interactions, style de présentation. La juxtaposition de toutes les caractéristiques fournies par le concepteur traduit un caractère particulier au produit (*intended product character*).

Pour lui, les caractères introduits produiront un attrait global du produit ainsi qu'un plaisir et une satisfaction à l'usage. Lors de l'utilisation, et suivant le contexte d'emploi, les qualités perçues d'attrait de plaisir et de satisfaction à l'usage de l'individu peuvent différer des conséquences pensées en amont par le concepteur.

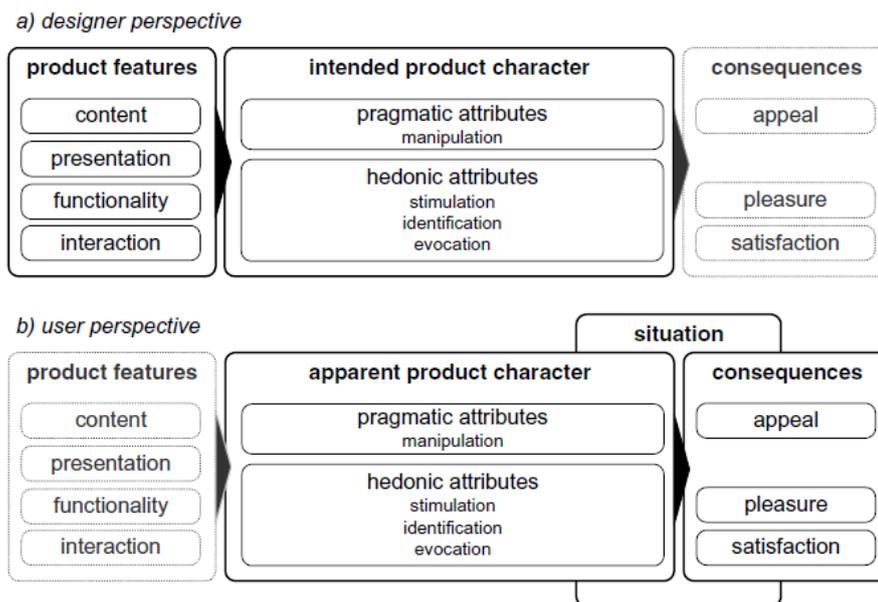


Figure 96: Le modèle UX d'Hassenzahl. Il peut y avoir dissonance entre le produit conçu par le concepteur et le produit perçu par l'utilisateur. Extrait de (**Hassenzahl, 2003**).

²⁵ "UX is a consequence of a user's internal state (predispositions, expectations, needs, motivation, mood, etc.), the characteristics of the designed system (e.g., complexity, purpose, usability, functionality, etc.) and the context (or the environment) within which the interaction occurs (e.g., organisational/social setting, meaningfulness of the activity, voluntariness of use, etc.)"

Selon Lallemand et Gronier (**Lallemand and Gronier, 2018**): « c'est le processus de design UX qui va garantir l'adéquation entre les points de vue du concepteur et de l'utilisateur ».

Pour un usager, la qualité peut être perçue selon deux dimensions : une dimension pragmatique associée à la manipulation du produit ; et une dimension hédonique dont les critères sous-jacents sont la stimulation, l'identification et l'évocation. Les deux dimensions sont définies par Lallemand et Gronier en ces termes : « *La qualité pragmatique du système désigne principalement les aspects instrumentaux du système ou produit, c'est-à-dire son utilité et son utilisabilité. Ces qualités pragmatiques vont soutenir la réalisation d'objectifs ou de tâches (appelés do-goals). La clarté du système, sa structure ou sa prévisibilité sont autant d'attributs liés à la qualité pragmatique* ».

La définition du caractère pragmatique d'un système fait écho avec les critères du capacitant que nous évoquons au chapitre premier de la partie DEUX ainsi qu'à l'un des objectifs attendus par le projet ANR Collaboration 4.0 (voir figure 97 pour un rappel des trois doctrines du capacitant et ses critères associés). En effet, l'évaluation de la dimension pragmatique permet de mesurer l'utilisabilité d'un système. Nous retrouvons là la concomitance entre les deux critères qu'avaient justifiés Tricot et alii dans leur article de 2003 (**Tricot et al., 2003**). De surcroît, le projet ANR Collaboration 4.0 interroge l'utilité du couple Homme-Machine dans le cadre global de l'interaction entre les deux entités au sein d'une situation de collaboration industrielle capacitante.

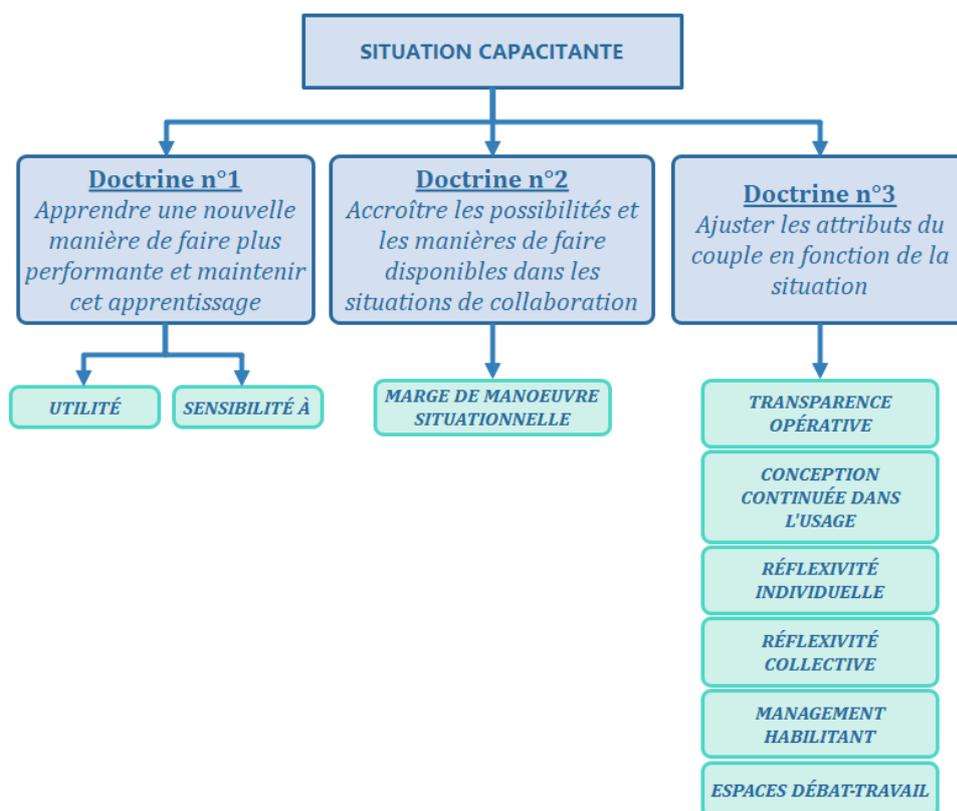


Figure 97: Rappel de la classification des critères d'une situation capacitante. D'après (**Compan et al., 2020**).

Par ailleurs, la doctrine n°3 (« Ajuster les attributs du couple en fonction de la situation ») d'une ECS postule l'idée qu'il faille permettre un ajustement du couple Homme-Machine dans le temps, notamment grâce à des critères tels que la transparence opérative. Or, ce critère réclame pour être effectif, certaines propriétés minimales d'accessibilité, et de

compréhension par l'utilisateur. La clarté du système exigée pour obtenir une dimension pragmatique acceptable au sein d'une UX est un lien fort avec ce critère du capacitant.

« *La qualité hédonique est quant à elle non instrumentale et se réfère au soi. Elle est liée à l'utilisateur et se base sur un jugement du potentiel du produit à procurer du plaisir et à satisfaire l'épanouissement de besoins humains plus profonds appelés be-goals. La capacité du système à stimuler l'utilisateur, à le connecter aux autres, à lui donner un sentiment de contrôle ou encore à lui conférer une certaine popularité sont autant d'attributs liés à la qualité hédonique* » (Lallemand and Gronier, 2018).

De la même façon que pour la dimension pragmatique, la dimension hédonique peut être rapprochée du critère de *sensibilité* à issu de la 1ère doctrine du capacitant. Compan et alii (Compan et al., 2020) évoquent les notions d'affects, d'émotions et d'humeurs ainsi que « *la sensibilité en lien avec les micro-identités et les aspects hédoniques de l'expérience utilisateur* ». Ils englobent en ce sens, les dimensions d'émotion et d'humeur sous le terme plus globalisant d'affect.

Les auteurs considèrent par ailleurs que la dimension de stimulation correspond à la recherche continue de développement des compétences, et à la fourniture de nouveaux potentiels. Nous retrouvons encore une fois, un lien fort entre les dimensions hédoniques que peuvent comprendre les systèmes en interaction au sein d'une situation de collaboration capacitante industrielle et les critères du capacitant tels que définis par Compan et alii à l'intérieur de la doctrine n°1.

III.1.1.2 Le modèle UX de Thüring et Mahlke

Le modèle de Thüring et Mahlke est focalisé principalement sur l'interaction entre l'individu et la technologie (fig.98). De ce fait, le modèle est aussi plus complet et explicite plus finement que le modèle de Hassenzahl, les composantes de l'expérience utilisateur. Lallemand et Gronier (Lallemand and Gronier, 2018) considèrent l'apport des trois facteurs communs (propriété du système, caractéristiques de l'utilisateur, et paramètres du contexte) comme influents sur le rapport Humain-Technologie en ces termes :

- « *Les **propriétés du système** renvoient à des solutions de conception particulières et sont spécifiques au produit. Elles comprennent les fonctionnalités, les propriétés de l'interface ou les dialogues* ».
- « *Les **caractéristiques de l'utilisateur** désignent tous les attributs de la personne qui interagit avec le système. On peut mentionner par exemple son profil démographique, ses attentes, besoins, motivations, valeurs, ou encore ses connaissances* ».
- « *Les **paramètres du contexte** incluent tous les aspects de la situation dans laquelle le système est utilisé. Ces facteurs comprennent les contextes physique, social, technique, temporel et celui de la tâche* ».

Le triptyque défini par Thüring et Mahlke explore plus précisément l'interaction entre l'Homme et la Machine. Finalement, cette interaction nécessite de penser les caractéristiques intrinsèques de l'individu (caractéristiques de l'utilisateur) et de la technologie (propriétés du système) dans une situation de travail donnée (paramètre du contexte) pour être capable de mesurer, d'évaluer la collaboration Homme-Machine. Notre projet de thèse consiste en la considération de la situation de travail Homme-Technologie comme une situation où l'opérateur et la machine partagent un même espace en vue de réaliser la tâche qu'ils partagent. Il s'agit de concevoir ce que la technologie va faire, mais surtout ce que l'homme va pouvoir faire avec la technologie, dans son environnement. Nous voyons un lien direct entre le modèle UX d'interaction Humain-Technologie proposé par Thüring et Mahlke, et l'objectif du projet ANR de développer une collaboration étroite entre cet Humain et cette Technologie.

Les composantes de l'UX présentes en figure 98 nous permettent de faire un lien avec le critère d'instrumentalisation présenté au [chapitre premier de la partie DEUX](#) et qui est l'un des critères présents dans la troisième doctrine du capacitant. En effet, le critère d'instrumentalisation défini par Rabardel ([Rabardel, 1995](#)) évoque une médiation entre un objet et un sujet à des fins d'appropriation des propriétés de l'instrument. Le processus d'instrumentalisation notamment, contribue à « *l'attribution de propriétés et transformations de l'artefact (structure, fonctionnement)* », ce qui évoque des critères plus précis comme l'utilisabilité, le contrôle de l'individu sur l'instrument, mais aussi l'aide apporté par ce dernier, et questionne finalement son utilité. Tous ces critères de l'instrumentalisation, nous les retrouvons dans la perception des instrumentales de l'UX telle que définie par Thüring et Mahlke.

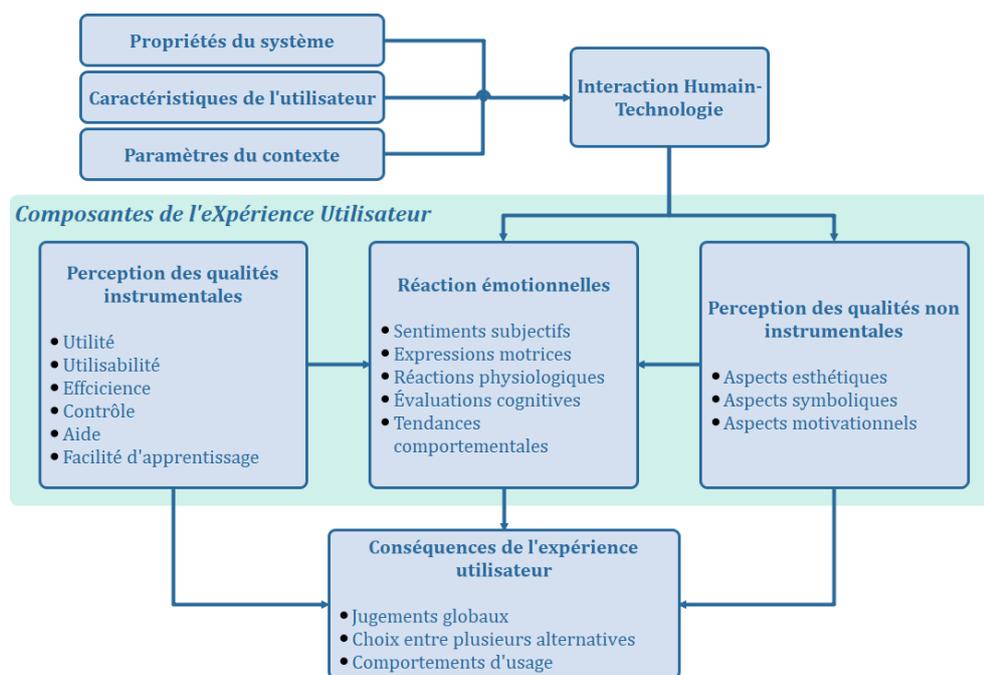


Figure 98: Le modèle UX de Thüring et Mahlke. D'après (Thüring and Mahlke, 2007).

Les parallèles que nous avons pu mettre en lumière entre les modèles de design UX et nos objectifs au sein du projet ANR ainsi que certains critères du capacitant permet de nous appuyer sur ces méthodes de conception d'expérience utilisateur pour bâtir une interface Homme-Technologie qui soit capacitante afin d'aboutir à ce que Compan et alii ([Compan et al., 2020](#)) nomment une Situation de Collaboration Capacitante (ECS).

Il nous faut cependant déterminer quels seront les moyens de validation de cette situation de collaboration Homme-Machine et comment assurer que c'est l'ajout de la valeur ajoutée provenant des critères du capacitant qui améliorent substantiellement le rapport Humain-Technologie. Il faut donc considérer un cas où l'Humain interagit dans un cadre de collaboration dite non-capacitante avec un cas connexe où l'individu est en « relation plus capacitante » avec le dispositif interactif qu'il utilise.

Ensuite, il faut déterminer ou créer les outils de diagnostics utiles pour comparer ces deux situations, capacitante et non-capacitante. Ces outils de diagnostics sont construits en suivant la méthode de design UX de Lallemand et Gronier ([Lallemand and Gronier, 2018](#)). Ces deux tâches, de création d'une situation de comparaison entre une relation capacitante et une relation non-capacitante, et de détermination des outils de mesure et de diagnostics des situations créées sont décrites dans la prochaine section de ce même chapitre.

Section 2 Les moyens de validation empiriques de notre méthodologie expérimentale

III.2.1 Construction du moyen comparatif des situations de collaboration Homme-Machine

Avant toute chose, il faut déterminer le type de situation de collaboration souhaitée. En fin de [chapitre III de la partie UNE](#), et surtout au cours du [chapitre IV de la partie UNE](#), sont évoqués les différents types d'IHMs pouvant être utilisés dans le cadre industriel, qui cadre bien avec la problématique de fournir à l'individu une situation de collaboration épanouissante, et qui lui permette d'apprendre et d'évoluer vers plus d'autonomie et de responsabilisation lors de son travail.

De plus, comme démontré en fin de [chapitre premier de la partie DEUX](#) au travers de la figure 88, les IHMs n'ont pas toutes vocation à invoquer les mêmes critères du capacitant. Il faut donc considérer les possibilités offertes en regard des capacités d'organisation d'expérimentation. De fait, nous n'avons pas accès à un terrain purement écologique de mise en situation en milieu industriel. Nous devons donc nous contenter d'une expérimentation en laboratoire. Par ailleurs, les contraintes temporelles s'exerçant dans le cadre de la thèse influent fortement sur la capacité à pouvoir conduire une expérience sur le long terme. Sans marge de manœuvre organisationnelle et temporelle pour conduire une expérimentation globale justifiant de la véracité de toutes les IHMs et des contraintes qu'elles invoquent, nous visons une étude expérimentale qui en valide le principe.

L'IHM de réflexion est une interface fortement corrélée aux critères du capacitant organisationnels (espaces débat-travail, management habilitant, réflexivité individuelle et collective) en plus de nécessiter des opérateurs à la fois expérimentés sur les tâches de leur poste de travail en plus d'avoir une connaissance des interactions Homme-Machine que leur fournit la technologie immersive et interactive. Or, nous n'avons pas ce type de population à notre disposition dans le cadre de notre thèse et il n'existe pas, à notre connaissance, d'industriel ayant développé des IHMs à l'aide des critères du capacitant. En conséquence, notre expérimentation ne peut être basée sur une interface de type Réflexion.

L'IHM de Pratique nécessite aussi une population ayant adoptée des interfaces Homme-Machine développées à l'aide du capacitant d'une part, et ayant déjà été formé à l'interaction avec un dispositif interactif. La confluence de ces deux impératifs conduit à ne pas envisager cet axe de recherche.

L'IHM Identification en revanche, peut admettre l'expérimentation en laboratoire. En effet, comme définis au [chapitre premier de la partie DEUX](#), l'interface a pour objet de former l'opérateur futur au travail qu'il aura à réaliser sur la chaîne de production de l'usine. L'individu peut ainsi venir avec ou sans expérience de la technologie de RA mais aussi sans expérience du poste de travail d'une part. D'autre part, les critères du capacitant explorés dans le cadre de ce type d'IHM sont très liés à l'exploration du couple Homme-Technologie et n'ont pas de lien avec les critères organisationnels mis en place dans l'usine, critères organisationnels que nous ne pouvons pas répliquer dans une expérience en laboratoire.

L'IHM Identification est une interface d'apprentissage aux tâches prescrites utile à une population n'ayant, a priori, pas d'expérience préalable à l'interaction avec un dispositif interactif et n'ayant pas connaissance des tâches à réaliser sur le poste de travail pour lesquelles elle sera formée. En conséquence, il faut trouver un poste de formation ou en créer un. Ce poste de formation donne lieu à l'analyse d'une situation de collaboration Homme-Technologie afin de modéliser des situations de travail collaboratives Homme-Machine performantes et définir un nouveau cadre conceptuel caractérisant les indicateurs de performance.

Une expérience menée au laboratoire G-SCOP en 2019, teste plusieurs types de réalité augmentée (un visiocasque Hololens 1ère génération, un écran tactile et une tablette) sur la réplique d'un poste de formation issu du monde industriel et prospecte les écarts ergonomique et technologique d'une interface de formation, développée au sein d'une entreprise industrielle spécialisée dans l'automobile (**Pusch and Noël, 2019**). La même interface est utilisée sur des supports différents, les résultats de la recherche portent notamment sur les limites que les dispositifs interactifs occasionnent. Ainsi, la collaboration Homme-Technologie est peu abordée, et toujours sous l'angle des caractéristiques techniques des dispositifs : « *Outre le faible confort de port et le FoP relativement petit, sa fragilité fait qu'il est difficile d'imaginer qu'il puisse être employé "dans la nature industrielle" dans un avenir proche* »²⁶ statuent les auteurs vis-à-vis du visiocasque ou encore, dans le cas de la tablette : « *Interagir avec lui par le biais du toucher peut aujourd'hui être considéré comme "naturel". Mais la taille de son écran et le fait que le stagiaire doive le regarder activement en font un candidat plutôt médiocre pour les programmes de formation autonome* »²⁷. Néanmoins, le travail effectué sur cette étude industrielle a permis la construction d'une réplique du poste de travail tel qu'il est bâti sur la ligne de fabrication de l'usine. Le laboratoire G-SCOP possède ainsi toujours la réplique du poste de formation ainsi que les composants et le sous-ensemble sur lesquels les composants doivent être montés. L'interface développée pour la formation des opérateurs est en toujours disponible. Cette réplique du poste de travail ainsi que l'interface développée à l'époque est utilisée pour la comparaison entre une IHM produite sans les critères du capacitant avec une nouvelle, développée selon les critères d'une situation de collaboration capacitante.

Dorénavant, il faut effectuer une analyse du poste de travail, et réaliser la complétion des tâches prescrites avec cette IHM afin de statuer sur la situation de collaboration capacitante relative de celle-ci, puis développer une seconde IHM qui permettra une situation de collaboration plus capacitante.

III.2.2 Analyse du poste de formation en regard des trois doctrines constituant une Situation de Collaboration Capacitante (ECS)

III.2.2.1 Description du poste et de l'ancienne interface

Le poste de travail est un poste de formation à l'assemblage de pièces sur un sous-ensemble préexistant. Ce poste de formation utilise la technologie de RA pour donner à l'opérateur les consignes inhérentes à la sécurité au poste et aux étapes d'assemblage.

Le poste permet l'assemblage de composants (clip noir et clip blanc, cordelette et coulisse) sur un sous-ensemble (glace de custode) nommée pièce principale (fig.99). La table (fig.100(a)) possède de nombreuses butées permettant de positionner la pièce principale et de la garder en position fixe. Des crochets à l'avant de la table donne la possibilité de positionner la pièce principale à la verticale.

Il y a 8 étapes, depuis l'étape 0 rappelant les règles de sécurité, à l'étape 7 utile au conditionnement du sous-ensemble entièrement monté dans le bac de conditionnement prévu à cet effet. La procédure se décompose comme suit :

1. Montage du clip noir sur la pièce principale ;
2. Montage de la coulisse sur la pièce principale ;

²⁶ *"Beside the poor wearing comfort and the relatively small FoP, its fragility makes it hard to imagine to see it being employed "in the industrial wild" any time soon"*

²⁷ *"Interacting with it via touch can nowadays be considered "natural". But its display size and the fact that the trainee has to actively look at it, make it a rather poor candidate for autonomous training programmes"*

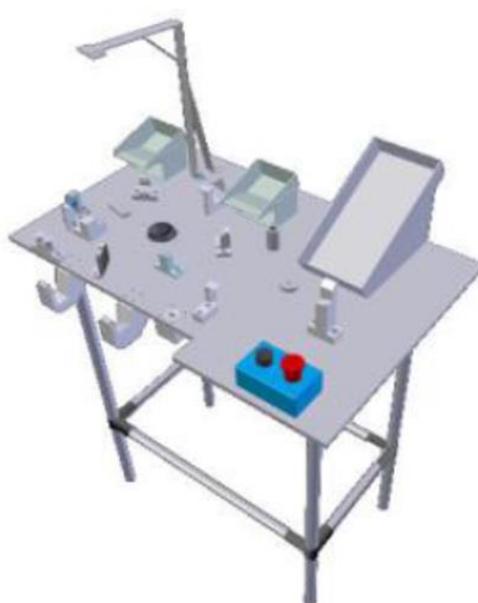
3. Mise en position à plat de la pièce principale sur la table ;
4. Montage du clip blanc sur la pièce principale ;
5. Mise en place de la cordelette sous la lèvre du joint à lèvres et la bloquer sur la pièce principale ;
6. Mise à la position verticale de la pièce principale et fixation de la cordelette sur la pièce principale ;
7. Conditionnement de la pièce principale dans le bac prévu à cet effet.



Figure 99: Les composants et le sous-ensemble. De gauche à droite et de haut en bas : clip noir, clip blanc, cordelette, coulisse et glace de custode.



(a)



(b)

Figure 100: Le poste de formation. (a): la réplique réelle. (b): le modèle CAO.

Pour que les informations virtuelles s'affichent au bon endroit sur la scène réelle, il est nécessaire de calibrer le système de RA avec l'environnement réel. Pour ce faire, un

modèle CAO du poste (fig.100(b)) a été conçu et il est nécessaire de positionner cet avatar virtuel sur le modèle réel (fig.100(a)). L'opération de calibration du modèle CAO (disponible dans l'application) avec le modèle réel s'effectue par une mise en concordance du premier sur le second (fig.101). L'opération consiste à positionner un cube blanc sous le pied arrière gauche du poste de travail réel (fig.101), puis, à travers la pression de touches sur un clavier d'ordinateur, d'effectuer les translations et les rotations nécessaires à la mise en position fine du modèle CAO sur le modèle réel.

L'interface démarre en montrant un rectangle bleu. Celui-ci reste visible tout au long des étapes de production (fig.104). L'IHM ne fournit pas l'information qu'il faut positionner le cube sur la patte arrière gauche du poste réel. Idem pour les touches du clavier, l'interface n'explique pas les touches sur lesquelles il faut appuyer pour positionner finement le modèle CAO sur le modèle réel. Enfin, au démarrage de l'interface, un « bip » retentit.



Figure 101: L'étape de calibration dans l'IHM. Ici, les interactions sont fournies par le visiocasque Microsoft Hololens 1ère génération.

L'étape de calibration effectuée, l'opérateur arrive sur un menu principal dont sont visibles les interacteurs « Phase formation » et « Phase validation ». L'entrée de l'une ou l'autre des phases est quasiment identique à ceci près que dans la phase validation, la pression sur les bandeaux rouges énonçant les opérations à effectuer donnent lieu à des informations supplémentaires sur le concept sous-jacent justifiant l'intérêt de la complétion de la tâche. La façon de déverrouiller ces informations dans l'IHM n'est pas explicitement donnée. Quand l'opérateur entre dans l'une ou l'autre des phases, il perçoit un processus général d'assemblage (fig.102(a)). Celui-ci consiste en une suite numérotée de 0 à 7 correspondant aux étapes que nous exposons précédemment. A chaque étape, une suite d'informations peut s'afficher afin de décomposer la tâche prescrite en opérations élémentaires, ici (fig.102(b)), les informations de montage de l'étape 5 (« mettre la cordelette ») est visible via un encadré rouge qui fournit les opérations élémentaires de montage de la cordelette sur la pièce principale. Cet encadré est accompagné de deux photos visibles dans le coin supérieur gauche de la figure 102(b). Un retour d'information audio en langue française et un écran vidéo, de l'assemblage complet des composants sur la pièce principale, tournant en boucle sur demande en face de l'opérateur (fig.103) complètent le dispositif d'assemblage.



Figure 102: Quelques vues de l'IHM de 2019. (a): le processus général numéroté de 0 à 7 (hors champ). (b): les informations de montage de l'étape telles qu'elles sont affichées dans le dispositif interactif.

Par défaut, l'encadré rouge et les photos ne sont pas visibles. Une forme géométrique représentant un « plus » jaune est affichée. En cliquant dessus dans l'interface ce « plus » se transforme en un « moins » jaune et les informations complémentaires s'affichent alors. Le « moins » jaune est visible en figure 102(b) sur le bord supérieur gauche de l'encadré rouge. Côté métaphore d'interaction, aucun mouvement n'est associé à la forme du « plus ». L'utilisateur doit comprendre par lui-même que l'on peut cliquer dessus. Par ailleurs, les photos affichées sont petites dans le champ visuel de l'interface.

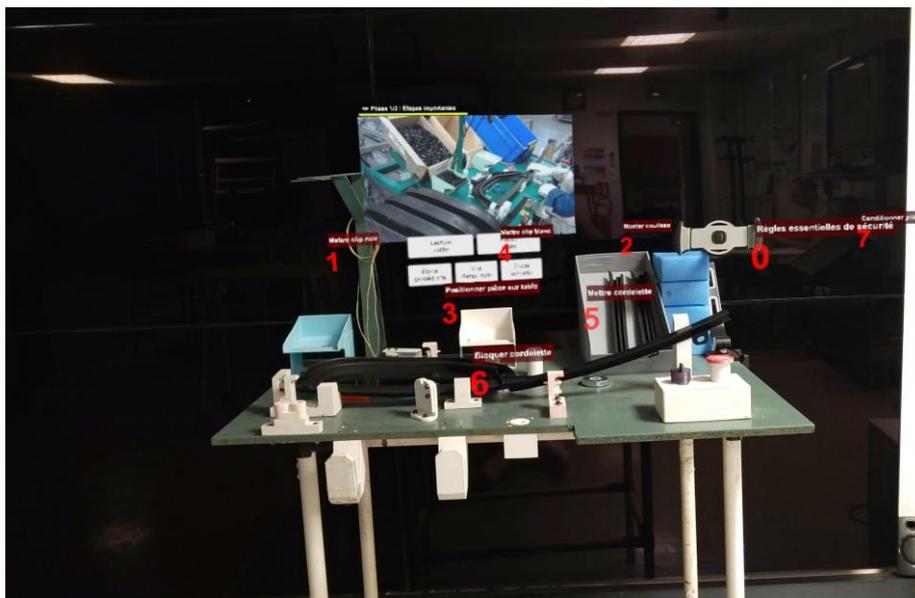


Figure 103: Le processus de montage des composants sur la pièce principale. On voit l'écran vidéo montrant les différentes étapes d'assemblage.

Pour pénétrer dans une tâche prescrite, dans l'ordre exigé allant de 0 à 7, l'utilisateur doit cliquer sur le chiffre correspondant. L'interface fournit une métaphore d'interaction à l'utilisateur. Cette métaphore est un mouvement d'avant en arrière du chiffre dans le champ visuel. Le mouvement oscillatoire est cependant très léger.

Des animations 3D sont disponibles à chaque étape du processus. Les animations sont, en première analyse, gênantes car elles empêchent une visibilité correcte de l'endroit où

l'opérateur doit placer les éléments, les avatars virtuels étant très opaques et d'une couleur orange foncé.



Figure 104: Vue de l'IHM Rouge et des animations 3D projetées.

L'écran vidéo est déplaçable dans l'espace mais aucune affordance n'est associée à cette possibilité offerte, ni aucune information textuelle ou audio. Par ailleurs, la vidéo d'assemblage de la vidéo est rapide, l'opératrice filmée semblant être particulièrement expérimentée sur son poste de travail. À la fin du processus, l'IHM reboucle au début du processus en phase validation et passe à la phase validation si l'opérateur a sélectionné la phase formation. Aucune information n'est portée à l'attention de l'individu.

III.2.2.2 Analyse de la situation de collaboration Homme-Machine à l'aune des critères du capacitant

Analyse de la situation en regard de la doctrine n°1 (Apprendre une nouvelle manière de faire plus performante et maintenir cet apprentissage) :

- ⇒ L'étape de calibration est longue et fastidieuse. Par ailleurs, le manque d'information sur le « quoi faire » et la manière de faire nuit à la compréhension de la tâche à réaliser par l'individu.
- ⇒ Les photos peu visibles, car de petite taille, nuisent aux performances attendues sur le poste de travail, puisque l'opérateur doit prendre un temps non négligeable pour déterminer le résultat attendu sans prescription de la tâche.
- ⇒ L'écran vidéo transmet une vidéo qui tourne en boucle. Il n'est pas possible d'obtenir la séquence de montage propre à l'étape à laquelle nous sommes à un instant donné sauf à cliquer sur le bouton « étape précédente » ou « étape suivante ». Or, cette possibilité n'est pas explicitement fournie à l'individu. Ainsi, dans le cas où celui-ci n'aurait pas compris par lui-même qu'il doit appuyer sur les boutons concernés, il doit attendre que la vidéo boucle sur la tâche précise sur laquelle il officie sur le moment

Analyse de la situation en regard de la doctrine n°2 (Accroître les possibilités et les manières de faire disponibles dans les situations de collaboration) :

- ⇒ Le séquençage des tâches prescrites ôte à l'utilisateur le pouvoir d'agir différemment de ce qui a été établi dans le processus tel qu'il se présente (figures 102(a), et 103).

Analyse de la situation en regard de la doctrine n°3 (Ajuster les attributs du couple en fonction de la situation) :

- ⇒ L'interface ne demande jamais à l'opérateur ce qu'elle attend de lui. Pas de retour d'information sur ce qu'il est nécessaire de faire par l'individu. Par exemple, le rectangle bleu en début d'étape de calibration n'est pas explicite en regard de ce qui est attendu par la machine.
- ⇒ Pas de retour au menu principal possible.
- ⇒ Les simulations 3D gênent la visibilité du montage réel. Il n'est de surcroît pas possible de cacher ces modélisations 3D.
- ⇒ L'écran vidéo est déplaçable dans l'espace. Cependant, aucune métaphore d'interaction n'est associée à cette possibilité.
- ⇒ La possibilité d'afficher et/ou de cacher les informations visuelles ne sont pas associées à des métaphores d'interaction. De plus, aucune information n'est donnée pour avertir l'utilisateur qu'il est possible de le faire quand c'est possible.

L'IHM développée en 2019 pour la réalisation de l'étude explicitée par Pusch et Noël (**Pusch and Noël, 2019**), ne pourvoit pas complètement aux nécessités d'une situation de collaboration capacitante entre l'Humain et la technologie. En effet, celle-ci est basée sur le modèle de SEEHEIM historique, sans prise en compte des Facteurs Humains (figure 40 du **chapitre III, partie UNE**). Il en résulte une interface fonctionnelle mais rigide qui n'admet pas d'usage qui s'écarterait un tant soit peu de la démarche pensée par le concepteur. Nous pouvons donc considérer le développement d'une nouvelle IHM de formation qui s'appuiera sur les critères du capacitant pour générer une ECS.

III.2.2.3 Développement d'une nouvelle IHM basée sur les critères du capacitant

Le développement de la nouvelle IHM suit les méthodes de design UX comme évoquées en section 1 de ce chapitre :

1. Rédaction d'un Cahier des Charges ;
2. Fiche de définition pour chaque spécification ;
3. Scénarisation de chaque étape du processus ;
4. Rédaction d'une fiche d'assemblage pour chaque étape du processus.

Le Cahier des Charges (CdC) est pensé de façon à faire corrélérer les fonctions de l'IHM aux critères du capacitant. Le CdC est découpé en trois parties : une partie associée à la phase d'habitué de l'individu à la technologie, une seconde phase associée à l'étape de calibration, une troisième phase associée à la formation au poste proprement dite. Nous reviendrons plus longuement sur le séquençage des étapes (habitué, calibration et formation) et étayerons ce choix, dans le **chapitre premier, section 1 de la partie TROIS**. L'objectif lors de la rédaction du CdC est de déterminer les fonctions essentielles pour permettre la complétion des tâches prescrites sur le poste en regard de la considération des critères du capacitant. La figure 105 expose une partie des fonctions rédigées dans le CdC. Chaque fonction est associée à un code (« Gé » pour les fonctions générales, « Ap » pour les fonctions d'habitué, « Ca » pour les fonctions utiles à l'étape de calibration, enfin « Fo » pour la phase de formation), possède une désignation, et fait

écho à un critère du capacitant. Un lien vers une fiche technique de chaque fonction permet au développeur d'aller chercher des informations complémentaires.

Chaque fiche technique détaille la fonction du point de vue de ce qui sera affichée dans le dispositif interactif. De plus, les interacteurs associés aux éléments virtuels affichés sont définis dans la fiche via les taxonomies de Poupyrev et Papadopoulos et alii. Par ailleurs, la tâche est décomposé en opération élémentaire à l'aide de la taxinomie de Bowman et Hodges. Enfin, si possible, nous associons des paramètres opérationnels QCD (Qualité, Coût, et Délai). Un exemple de fiche technique est disponible en annexe 1.

CODE	DESIGNATION	CRITERE D'APPRÉCIATION	CRITERE CAPACITANT	FLEXIBILITÉ	LIEN VERS FICHE TECHNIQUE
Fo.1	Insérer un <i>timer</i> qui démarre dès le début de la phase de production, qui s'arrête à sa fin, et qui stocke l'information de temps (en secondes)	Accroissement des performances	Critère Capacitant 1	F0	Fiche Fo.1
Fo.2	Jouer sur la surimpression du modèle virtuel sur le modèle réellement assemblé afin de détecter les erreurs OU insérer des <i>colliders</i> pour permettre un contrôle en temps réel de la position/orientation de la pièce assemblée sur le modèle exact souhaité	Accroissement des performances	Critère Capacitant 1	F0	Fiche Fo.2
Fo.3	Créer un lien entre le regard et le bouton effectivement regardé	Transparence Opérative	Critère Capacitant 3	F0	Fiche Fo.3
Fo.4	Informé l'utilisateur que les informations/fenêtres sont déplaçables dans l'espace, peuvent être agrandies/rétrécies, et fermées	Transparence Opérative	Critère Capacitant 3	F0	Fiche Fo.4
Fo.5	Si temps de chargement conséquent, afficher un % d'avance et fournir les informations détaillées à ce sujet	Transparence Opérative	Critère Capacitant 3	F2	Fiche Fo.5

Figure 105: Une partie du CdC associée à la phase de formation. Chaque fonction est associée à un critère du capacitant.

Avec ces fiches techniques, il faut scénariser chaque étape du processus proprement dit. Dans notre cas, il s'agit de scénariser les huit étapes du processus. On décompose ce processus en découpant une tâche (« Mettre la cordelette ») en deux tâches distinctes (« Mettre la cordelette » et « Bloquer la cordelette »). On obtient ainsi un processus à neuf étapes dans notre nouvelle IHM, l'étape 0 correspondant à l'explicitation des règles de sécurité :

1. Montage du clip noir sur la pièce principale ;
2. Montage de la coulisse sur la pièce principale ;
3. Mise en position à plat de la pièce principale sur la table ;
4. Montage du clip blanc sur la pièce principale ;
5. Mise en place de la cordelette sous la lèvre du joint à lèvre de la pièce principale ;
6. Bloquer la cordelette sur la pièce principale ;
7. Mise à la position verticale de la pièce principale et fixation de la cordelette sur la pièce principale ;
8. Conditionnement de la pièce principale dans le bac prévu à cet effet.

Pour pouvoir intégrer de la marge de manœuvre situationnelle au cours du travail de formation, il a fallu revoir le processus, comprendre quelles tâches étaient liées les unes aux autres et quelles tâches peuvent éventuellement être dissociées du cheminement linéaire de l'ancienne IHM. Il en résulte le synoptique des tâches du processus suivant (fig.106) :

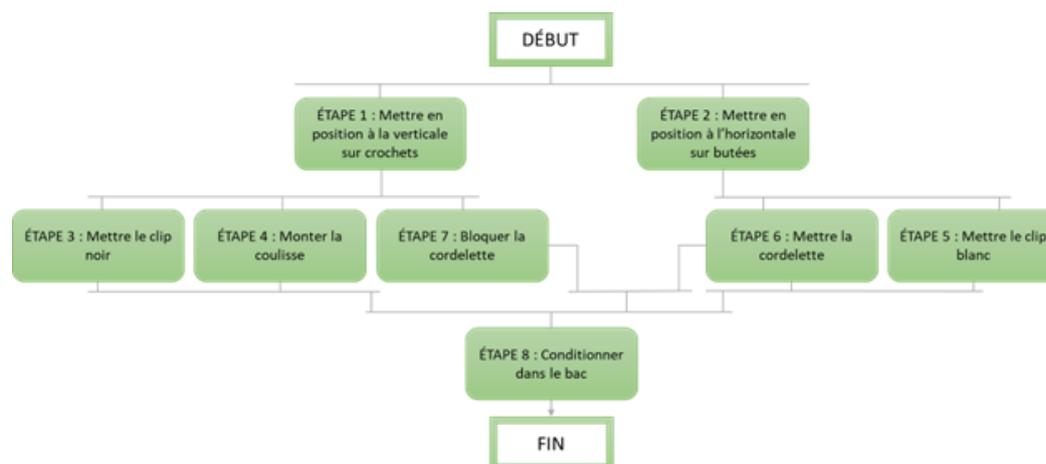


Figure 106: Synoptique du processus revu pour casser sa linéarité.

Les étapes qui sont les unes à côté des autres peuvent être réalisées en parallèle, elles découlent de la tâche prescrite immédiatement au niveau supérieur. Les étapes six et sept sont liées mais ne découlent pas du même ensemble sériel. L'opérateur, lors de sa formation pourra réfléchir à la meilleure façon de procéder sachant qu'il faut mettre la cordelette avant de pouvoir la bloquer. En formation, l'opérateur inférera dans un premier temps le cheminement le plus adéquat, puis, à l'aune des premiers montages effectués, apprendra ce qu'il considérera comme le cheminement de complétion du processus le plus performant. Cette construction du processus est importante car il faut penser en amont du développement, l'intégralité des marges de manœuvre que l'on peut offrir aux individus, afin de répondre favorablement à la seconde doctrine du capacitant : *Accroître les possibilités et les manières de faire disponibles dans les situations de collaboration.*

Un exemple de scénarisation est porté en annexe 2. Chaque étape de résolution de la tâche est ainsi esquissée pour que le développeur puisse connaître, à chaque instant de collaboration de l'individu avec le dispositif, quels sont les éléments virtuels et les interacteurs associés à afficher dans le champ visuel de l'opérateur. La scénarisation de l'interaction au cours du temps fait écho aux techniques de *storyboarding* présentes dans les méthodes de design UX notamment dans celui de Lallemand et Gronier (Lallemand and Gronier, 2018). Une fiche complète par étape du processus détaille le scénario de réalisation de l'étape, les éléments d'interaction, la nature des interacteurs, la décomposition de la tâche en opérations élémentaires. Une fiche est disponible à l'examen en annexe 3. Tous ces éléments ont permis le développement de la nouvelle IHM que nous détaillons dans le paragraphe suivant.

III.2.2.4 Présentation de la nouvelle IHM

La nouvelle IHM ne possède pas de menu principal où l'individu doit choisir entre une phase et une autre. Au lancement, l'IHM demande à l'opérateur d'observer le QR-Code (fig. 107) qui a été apposé dans le coin avant gauche du poste de travail afin de calibrer automatiquement le modèle CAO sur le modèle réel. Ceci est dorénavant possible grâce aux nouvelles librairies associées à l'Hololens 2.



Figure 107: Le QR-Code présent dans le coin avant-gauche sert à la calibration du système interactif.

Une fois la calibration effectuée, l'individu pénètre dans la scène de l'interface. Ici, trois fenêtres principales sont visibles (fig.108) : Un écran vidéo sur la gauche. Il servira à lancer les vidéos de montage des éléments ; le synoptique du processus et les boutons principaux (afficher/cacher les performances au poste [le temps de montage global], afficher/cacher la nomenclature, valider l'étape, afficher/cacher le panneau de configuration, ajouter un widget).

Un code couleur est associé au synoptique comme cela avait été esquissé dans les scénarios. Une couleur bleue correspond à une tâche parallèle indisponible, la couleur jaune à une tâche en cours, une tâche grise à une tâche indisponible qui n'est pas parallèle, enfin une couleur verte correspond à une tâche réalisée.

Sur le côté droit, le panneau de configuration permet l'affichage des vidéos, informations textuelles, animations 3D, informations audios, photos et la mise en forme des contours et aussi jouer sur la transparence des éléments virtuels.

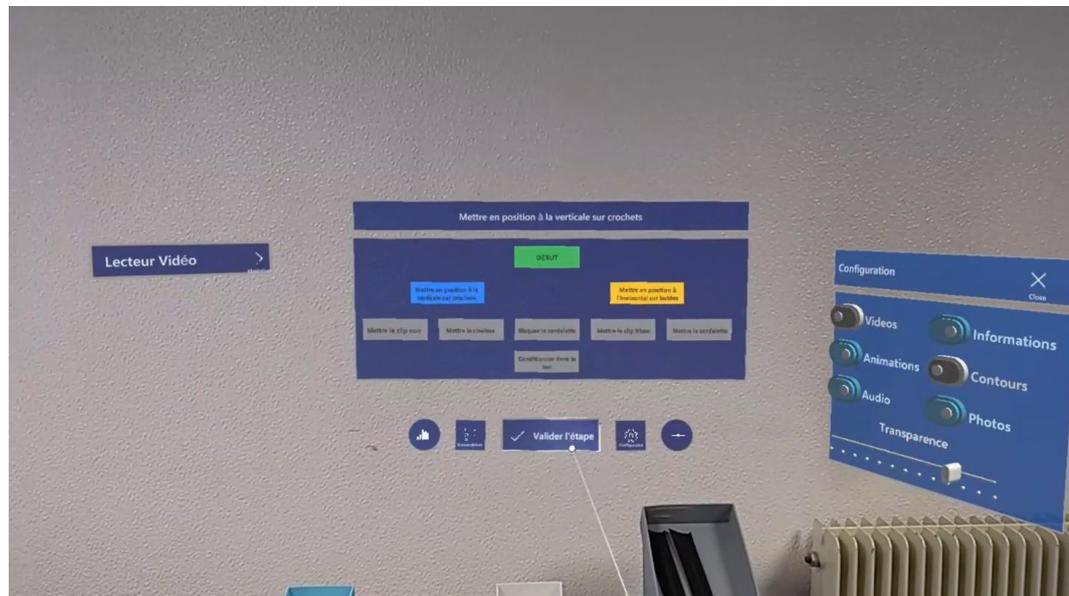


Figure 108: le tableau de bord de l'IHM.

Les individus ont ainsi la main sur la nature des informations qu'ils souhaitent afficher dans leur champ visuel. Ils peuvent mettre ainsi soumettre l'écran virtuel « à leur main ». Les fenêtres quelles qu'elle soient, possèdent des affordances qui s'activent lorsque l'individu approche sa main de la fenêtre. Ces affordances se présentent sous la forme de

« coins de valise » comme le montre la figure 110. Ces affordances nécessitent d'être comprises par l'individu.

Les informations textuelles peuvent être abscondes de prime abord pour un néophyte du poste de travail. Par exemple, dans l'IHM, la pièce principale est appelée par sa désignation technique : glace de custode. La nomenclature est alors particulièrement utile car à l'ouverture de celle-ci, l'opérateur peut visualiser la pièce incriminée et le nom qui lui est associé (fig. 109).



Figure 109: Photo de la nomenclature de la tâche prescrite d'assemblage des composants sur la glace de custode.

Les vidéos qui sont disponibles dans l'écran vidéo obtiennent de nouvelles interactions au sein de l'interface (fig.110). Désormais, les vidéos peuvent être accélérées ou ralenties en fonction du besoin de l'individu de contempler avec plus de détail les gestes inhérents à la complétion de la tâche prescrite.

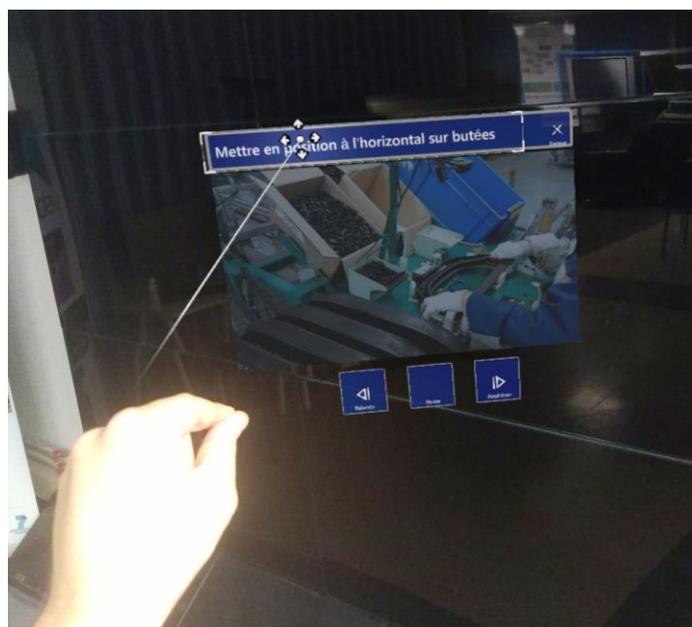


Figure 110: Interacteurs de mise au ralenti ou d'accélération des vidéos. Par ailleurs, nous voyons les affordances d'interaction (cadre entourant le titre de la fenêtre de la vidéo) qui apparaissent lorsque le pointeur entre en collision avec ces affordances.

Nous classifions notre IHM comme à la jonction de deux types d'interfaces que celles que nous évoquions au [chapitre III de la partie UNE](#). Celle-ci possède des qualités de flexibilité de la présentation grâce notamment à la prise en compte du critère d'instrumentalisation inhérent à la troisième doctrine du capacitant. Elle permet par ailleurs de choisir les modes d'interaction privilégiés au sein de l'interface (audio, vidéo, textuel, par animation 3D, etc.). Par ailleurs, l'interface possède un embryon de gestion des erreurs. Celui-ci n'est pas très étoffé et n'apprend pas encore des situations écologiques vécues par les usagers. Il aurait fallu intégrer une forme d'Intelligence Artificielle ne rentrant pas dans le cadre de cette thèse. Nous avons construit un correcteur d'action basé sur le modèle des tâches que nous avons décomposé à l'aide des taxonomies de Bowman et Hodges. Par exemple, en début de processus, l'interface fournit à l'opérateur le choix du positionnement initial de la pièce principale sur le poste de travail (fig.111), à la verticale ou à l'horizontale. Un ensemble d'éléments virtuels s'exécutant en parallèle de *timers* en arrière-plan permet de reconnaître le positionnement effectué par l'individu sur la table de travail et d'ajuster son comportement subséquent. Le correcteur d'action est un processus d'arrière-plan dont n'a pas conscience l'opérateur lors de l'utilisation de l'interface.



Figure 111: Le choix à effectuer par l'utilisateur en début de phase de production dans l'IHM de formation.

La nouvelle IHM utilise une méthode de conception des interfaces dite en cascade. Ce développement et l'expérience conduit pendant les périodes de confinement, ne permettait pas de gérer un panel constant d'utilisateurs qui auraient pu venir au fur et à mesure de l'avancée du développement pour effectuer les tests. Les conditions en laboratoire imposent un rythme différent de ce qui peut se faire en industrie.

La méthode de conception des interfaces en cascade est explicitée en figure 45 du [chapitre III de la partie UNE](#) de ce manuscrit. Nous avons donc poursuivi la phase de conception, de réalisation et les pré-tests d'intégration au sein d'un groupe restreint composé de nous-même, du développeur et de quelques collègues qui ont effectués ces tests d'intégration sans connaissance préalable des critères du capacitant. A la fin du processus de développement et de pré-tests, nous avons opté pour une approche

empirique par diagnostic d'usage pour la validation de notre IHM tel qu'explicité en figure 46, [chapitre III de la partie UNE](#), de ce manuscrit.

Nous avons expliqué les différences qui existent entre l'ancienne IHM, développée en 2019 lors d'un projet précédent, L'IHM **Rouge** (fig.112(a)), et la situation de collaboration offerte par l'IHM nouvelle, développée à l'aide des critères du capacitant et des outils de design UX, que nous nommerons dorénavant IHM **Bleue** (fig.112(b)). Nous nommons ces IHM de cette façon car l'une et l'autre possède une couleur dominante d'où leur appellation d'une part, et d'autre part, il est nécessaire qu'au cours des expérimentations, il ne soit pas fait allusion auprès des participants, d'un état de l'IHM étudiée. En effet, le terme « ancien » pourrait biaiser l'expérimentation et laisser penser au participant que l'IHM ancienne donc Rouge est moins innovante que l'IHM nouvelle donc Bleue et finalement, que cette dernière est plus efficace que la première. Il faut désormais définir les critères d'évaluation des deux interfaces d'apprentissage au poste de formation.

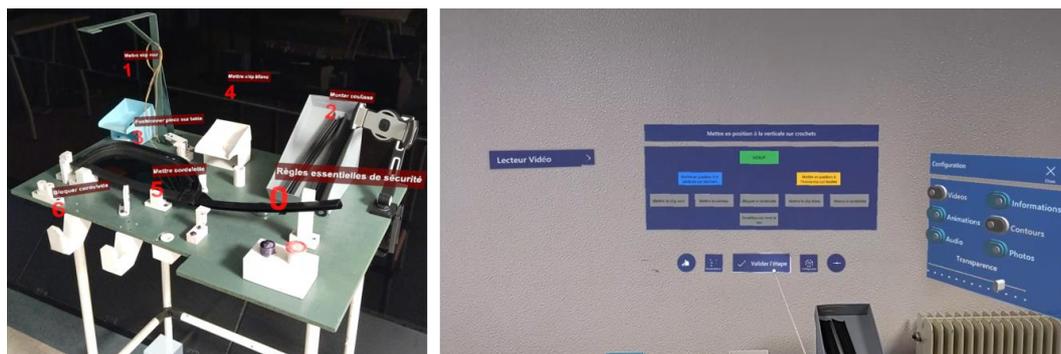


Figure 112: Les deux IHMs en notre possession. (a) L'IHM développée en 2019 par Pusch et Noël (Pusch and Noël, 2019); (b) L'IHM que nous avons conçu à l'aide des critères du capacitant.

III.2.3 Moyens de validation des critères du capacitant à travers la comparaison des deux interfaces

Le questionnement inhérent au moyen de valider les critères du capacitant par l'intermédiaire de l'usage d'interfaces de formation nécessite de penser à la procédure globale d'expérimentation. Il faut penser aux dispositifs sur lesquels effectuer les portages logiciels et les adapter aux interacteurs possibles au sein des interfaces de ces dispositifs interactifs. L'expérimentation de Pusch et Noël faite en 2019 (Pusch and Noël, 2019) prospectait notamment la collaboration au sein du Microsoft Hololens 1ère génération (fig.113(a)).



Figure 113: Les deux visiocasques de RA utilisés pour l'étude : (a) Le MICROSOFT Hololens 1 ; (b) Le MICROSOFT Hololens 2.

Depuis est apparu le Microsoft Hololens de 2ème génération (fig.113(b)). L'occasion est belle de tester au sein de deux visiocasques l'apport de la maturité technologique acquise par le fabricant via les éventuels retours d'expérience qu'il eut pu compiler en regard de l'utilisation qui est faite du dispositif de la génération antérieure. Par ailleurs, pour éviter tout biais de comparaison, il est souhaitable de ne pas modifier et le dispositif interactif,

et l'interface au cours des expérimentations de manière à être capable de cibler précisément les apports de tel ou tel domaine, logiciel ou matériel, dans la collaboration entre l'Homme et la technologie. L'IHM Rouge avec l'Hololens 1 est conservée telle quelle et est portée dans l'Hololens 2 en ajoutant les métaphores d'interaction qui ont été ajoutés sur la 2^{de} génération du visiocasque (notamment le suivi du regard, la sélection déictique des interacteurs, la reconnaissance des mains et le Ray-Casting). De cette manière, on peut comparer l'apport de nouvelles techniques interactives dans la « capacitance » de la collaboration Homme-Machine pour une même IHM.

Enfin, la nouvelle IHM, l'IHM Bleue a été développée uniquement sur l'Hololens 2. Ainsi, dans le cadre de la comparaison entre les deux IHMs, on dispose des mêmes types d'interaction et le même confort d'utilisation global. En conséquence, comparer uniquement l'apport des critères du capacitant dans la « capacitance » de la collaboration Homme-Machine (notre hypothèse 1) est accessible selon les modalités :

- **À ISO-visiocasque (Hololens 2) :** On compare les deux IHMs, Rouge et Bleue, et on détermine si les critères du capacitant sont pertinents dans le développement des interfaces Homme-Machine ;
- **À ISO-IHM (IHM Rouge) :** On compare l'apport des techniques interactives et du confort d'utilisation global des visiocasques, l'un par rapport à l'autre (Hololens 1 contre Hololens 2).

Il existe donc trois systèmes (visiocasque + IHM) pour notre expérimentation future :

- **IHM Rouge**/Hololens 1 : Le système 1 ;
- **IHM Rouge**/Hololens 2 : Le système 2 ;
- **IHM Bleue**/Hololens 2 : Le Système 3.

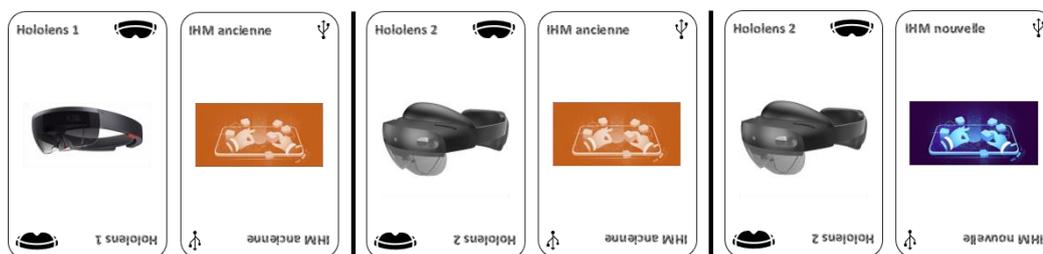


Figure 114: Les trois systèmes que nous considérons. De gauche à droite : (a) S1, Hololens 1 et IHM Rouge ; (b) S2, Hololens 2 et IHM Rouge ; (c) S3, Hololens 2 et IHM Bleue.

Un petit aparté sur les travaux de Herzberg à propos des théories du contenu motivationnel est nécessaire pour expliquer les hypothèses 2 et 3 formulées dans l'étude expérimentale, en plus de la première qui consiste en l'intérêt et la pertinence des critères du capacitant dans une situation de collaboration Homme-Machine. Herzberg a établi deux types de facteurs influençant la qualité de la motivation au travail qu'explique Louart (Louart, 2002) :

- « Les premiers sont extrinsèques (l'hygiène de vie). Concernant avant tout la qualité de l'environnement, ils répondent à des besoins en l'absence desquels on est mal à l'aise ou frustré. Leur manque ou leurs dysfonctionnements rendent insatisfaits, donc poussent les salariés à réclamer en leur faveur (par exemple en matière d'hygiène et sécurité, de conditions de travail, de rémunération de base, de rapports hiérarchiques ou de relations professionnelles). Mais leur présence apaise sans vraiment stimuler ».
- « Les seconds facteurs sont intrinsèques (l'auto-motivation). En font partie l'intérêt au travail, les responsabilités reçues, les rémunérations d'ordre incitatif, les possibilités de reconnaissance et d'accomplissement à travers l'activité ».

professionnelle. Ce sont eux qu'Herzberg préconise de développer par un enrichissement du travail incluant la préparation, le contrôle, la discussion des objectifs et la complexification des tâches ».

Ce que l'auteur expose c'est la motivation inhérente aux conditions de travail. Certaines conditions de travail, sembleraient faire décroître la motivation car ces conditions sont considérées comme des facteurs de motivation pour le salarié. A l'inverse, certaines conditions n'apportent pas par leur présence de motivation supplémentaire mais peuvent faire décroître la motivation par leur absence, ce sont les facteurs d'hygiène. Par exemple, un employé dans les hauts-fourneaux ne sera pas plus motivé si on lui donne des EPI (Équipements de Protection Individuelle) pour se protéger de la chaleur et des brûlures, en revanche l'absence d'EPI peut faire décroître sa motivation. Les EPI dans le domaine de la fonderie est un facteur d'hygiène. Côté facteur de motivation, un salarié de la même fonderie sera peut-être plus enclin à admettre un travail dans ces conditions, s'il est mieux payé que les salariés de la même catégorie socio-professionnelle. Le salaire peut être vu comme un facteur de motivation. Par effet de parallèle, on formule deux hypothèses concomitantes :

- Le taux de satisfaction à l'usage exprimée d'un système récent croît (d'un coefficient n) lorsque l'utilisateur compare celui-ci à un autre système plus ancien ;
- Le taux de satisfaction à l'usage exprimée d'un système ancien décroît (d'un coefficient p) lorsque l'utilisateur compare celui-ci à un autre système plus récent.

On peut estimer a priori que $n > p$. Ainsi si l'on effectue une permutation du visiocasque ancien (Hololens 1) vers le visiocasque plus récent (Hololens 2), à ISO-IHM, on devrait obtenir des performances et une expérience vécue en augmentation plus nette que si l'on effectue la permutation d'un visiocasque récent (Hololens 2) vers un dispositif plus ancien (Hololens 1). Nous faisons l'hypothèse que ceci est vrai aussi pour la permutation des IHMs.

Plus simplement, nous considérons comme hypothèse de recherche que la maturité technologique du dispositif ou celle de l'IHM générera un facteur de motivation pour l'individu lors de la phase de formation, à l'usage donc d'une IHM Identification (on pourrait supposer le contraire dans le cadre des IHMs Pratique et Réflexion eu égard à l'expérience que les usagers auraient alors acquis dans le cadre de leurs fonctions, mais nous n'avons pas les moyens de le vérifier expérimentalement).

Résumons rapidement les diverses hypothèses de validation empiriques et la procédure de notre expérimentation : on compare deux IHMs, une ancienne, la Rouge (fig.112(a)) développée sans les critères du capacitant, une récente, la Bleue (fig.112(b)) spécifiée et développée à l'aide des critères du capacitant. On fait varier les visiocasques, Hololens 1 (fig.113(a)) pour la seule IHM Rouge, Hololens 2 (fig.113(b)) pour la projection des IHMs Rouge et Bleue.

Nous obtenons donc trois systèmes : S1, un système IHM Rouge/Hololens 1 (fig.114(a)) ; S2, un système IHM Rouge/Hololens2 (fig.114(b)) ; S3, un système IHM Bleue/Hololens 2 (fig.114(c)). Chaque participant teste deux systèmes et nous autorisons la permutation de ceux-ci : S1/S2, ou S2/S1 pour les cas où l'on est à ISO-IHM ; S2/S3, ou S3/S2 pour les cas où l'on est à ISO-visiocasque. Enfin, nous avons trois hypothèses : H1, suppose que les critères du capacitant permettront une UX et une ECS de meilleure qualité, H2 considère que le passage de l'Hololens 1 à l'Hololens 2, ou de l'IHM Rouge à l'IHM Bleue, créera une UX plus qualitative d'un facteur n , H3 suppose que le passage de l'Hololens 2 à l'Hololens 1, ou de l'IHM Bleue à l'IHM Rouge, créera une UX moins qualitative d'un facteur p . Les informations relatives à toutes ces données sont compilées au sein de la figure 115.

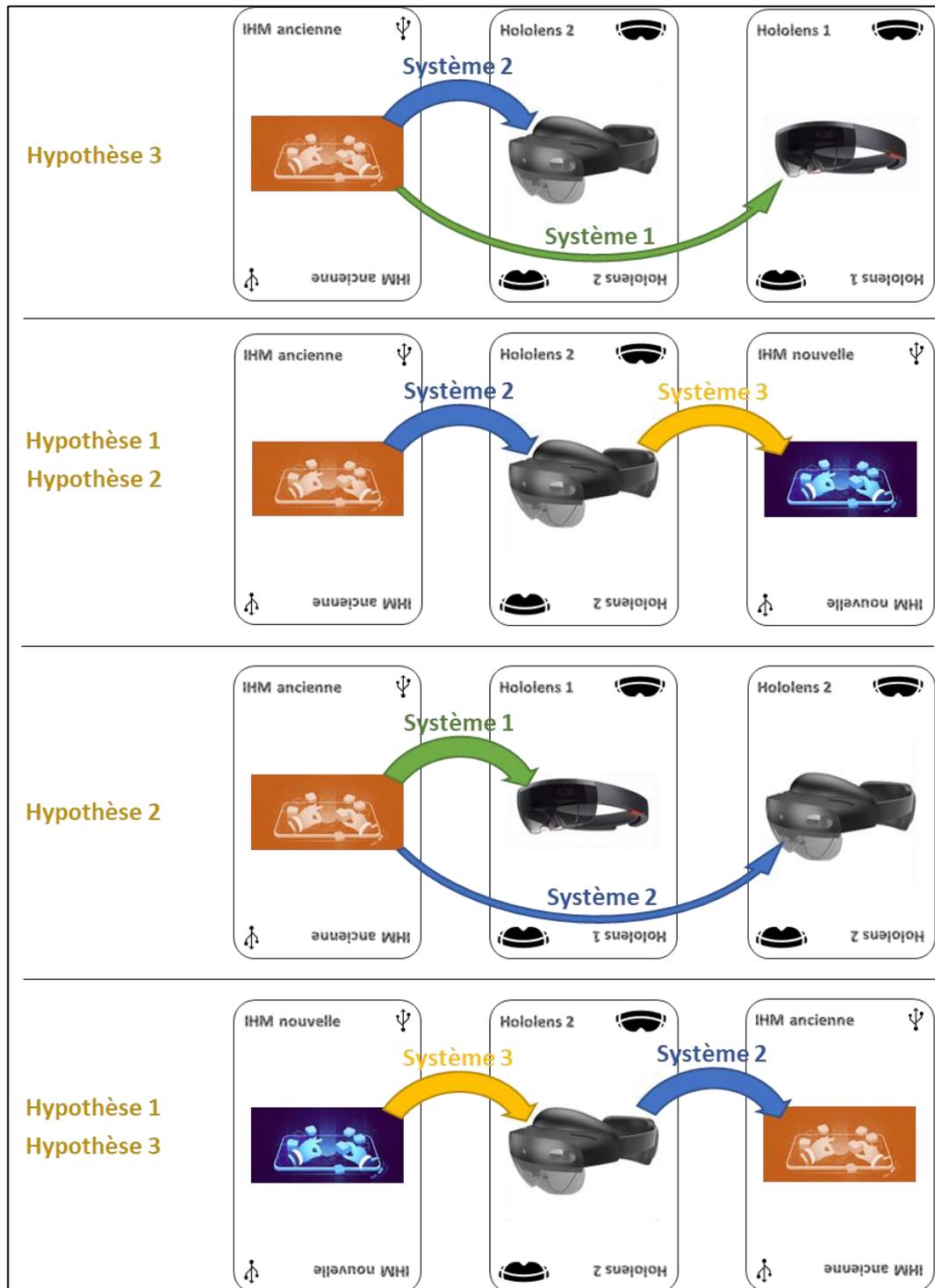


Figure 115: Infographie de la procédure générale de notre future expérimentation.

Nous expliquons dans le chapitre premier de la partie DEUX qu'il fallait étudier l'utilisabilité d'un système pour pouvoir mesurer l'utilité de celui-ci, Tricot et alii (**Tricot et al., 2003**) ayant montré une forte corrélation entre les deux dimensions. Ces deux dimensions permettront d'évaluer le critère d'utilité pratique inhérent à la première doctrine d'une Situation de Collaboration Capacitante (ECS). Par ailleurs, les qualités hédoniques du système à l'usage doivent être prospectées pour déterminer les affects de la collaboration et plus généralement la « *sensibilité à* », critère rentrant dans la première doctrine d'une ECS. Lallemand et Gronier (**Lallemand and Gronier, 2018**) donnent

quelques questionnaires psychométriques à vocation de mesure de toutes ces dimensions.

Parmi la liste à notre disposition, trois questionnaires, le test d'utilisabilité SUS élaboré par Brooke en 1996 (**Brooke, 1996**), le test USE de mesure de l'utilité (**Lund, 2001**), et le questionnaire AttrackDif2 (**Hassenzahl et al., 2003; Lallemand et al., 2015**) d'évaluation des qualités hédoniques sont retenus.

AttrackDiff			
Sous-échelle	Items (dans l'ordre de passation)		
QP_1	Humain	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Technique
QHL_1	M'isole	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Me sociabilise
ATT_1	Plaisant	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Déplaisant
QHS_1	Original	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Conventionnel
QP_2	Simple	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Compliqué
QHL_2	Professionnel	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Amateur
ATT_2	Laid	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Beau
QP_3	Pratique	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Pas pratique
ATT_3	Agréable	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Désagréable
QP_4	Fastidieux	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Efficace
QHL_3	De bon goût	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	De mauvais goût
QP_5	Prévisible	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Imprévisible
QHL_4	Bas de gamme	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Haut de gamme
QHL_5	M'exclut	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	M'intègre
QHL_6	Me rapproche des autres	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Me sépare des autres
QHL_7	Non présentable	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Présentable
ATT_4	Rebutant	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Attirant
QHS_2	Sans imagination	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Créatif
ATT_5	Bon	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Mauvais
QP_6	Confus	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Clair
ATT_6	Repoussant	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Attrayant
QHS_3	Audacieux	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Prudent
QHS_4	Novateur	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Conservateur
QHS_5	Ennuyeux	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Captivant
QHS_6	Peu exigeant	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Challenging
ATT_7	Motivant	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Décourageant
QHS_7	Nouveau	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Commun
QP_7	Incontrôlable	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	Maîtrisable

Note : Les items QP_1, ATT_1, QHS_1, QP_2, QHI_2, QP_3, ATT_3, QHI_3, QP_5, QHI_6, ATT_5, QHS_3, QHS_4, ATT_7 et QHS_7 sont inversés.

Figure 116: Les questionnaire AttrackDif2 interroge quatre dimensions : stimulation, identification, attractivité et aspects pragmatiques d'un système.

Ces trois questionnaires psychométriques possèdent une série de questions (10 questions pour le SUS, 8 pour le questionnaire USE et 28 pour l'attractDif2) basés sur des échelles de Likert. La complétion de ce type de questionnaire est simple et les participants comprennent d'emblée la manière dont ils doivent se placer sur ce type d'échelle. De plus, pour le questionnaire SUS, un nombre minimum de 12 personnes est retenu pour obtenir des résultats significatifs selon l'article de Guest & alii (**Guest et al., 2006**). Par ailleurs, ce questionnaire, le SUS, mesurant l'utilisabilité d'un système est très sensible à partir de douze utilisateurs selon Tullis & Stetson. À la lumière de cette étude le nombre minimal de participants pour avoir des résultats significatifs est estimé. La figure 115 montre quatre modalités de passage. En partant d'un nombre de participants égal pour chaque modalité et en prenant en compte le « plancher » de douze participants par système considéré (S1, S2 ou S3), il faudrait six participants pour chaque modalité. Rajoutons un

sujet par modalité pour pallier à un abandon en cours ou des résultats biaisés, nous passons à sept passages par modalité. Il faut donc un minimum de vingt-huit personnes pour cette étude. Ainsi sont testés 14 fois les systèmes S1 et S3, 28 fois le système S2, et 7 fois chaque hypothèse de recherche.

Finalement, les questionnaires SUS et USE sont relativement simples à comprendre et à utiliser. Le questionnaire AttrackDif2 est plus complexe à appréhender et à analyser. La figure 116 rappelle ce questionnaire. Il est composé de 28 questions mesurant quatre dimensions : une dimension pragmatique (QP) traduisant les qualités pragmatiques du système. Les réponses à ces questions sont corrélées aux réponses des tests USE et SUS qui interrogent les mêmes sujets. Les qualités hédoniques sont mesurées à l'aide des trois autres dimensions : hédonique de stimulation (QHS), hédonique d'identification (QHI) et attractivité globale du système (ATT). Pour chacune des quatre dimensions, sept questions sont posées avec l'utilisation d'échelle de Likert (à 7 points) mais contrairement aux deux questionnaires, ces échelles de Likert sont basées sur des différenciateurs sémantiques. L'individu se positionne au sein de cette échelle en fonction de la perception du système et de la perception que lui évoque celui-ci à l'aune des adjectifs qualifiants le système. Par exemple, à la question ATT_1 (Plaisant/Déplaisant), l'individu se positionne plutôt à gauche s'il trouve le système plaisant voire très à gauche si ce dernier lui plaît vraiment, et inversement, plutôt à droite voire très à droite suivant le sentiment de déplaisir qu'il a pu ressentir à l'usage du système. Le point central de chaque échelle est une position neutre.

L'évaluation globale pour chaque système est faite via un procédé associé au questionnaire de renversement des questions inversées, et de calcul spécifique des valeurs en fonction des positions des réponses au sein des échelles. Nous ne détaillons pas les calculs et les procédures de dépouillement des questionnaires au sein de ce manuscrit.

Ces trois questionnaires sont à passer à la fin de la complétion de chaque condition. Par condition, nous entendons chaque test sur un système (S1 ou S2 ou S3). Chaque participant opérant deux tests, ils remplissent ces questionnaires deux fois, pour chaque système utilisé et tout de suite après la fin du test. Le détail de la procédure d'expérimentation est exposé au [chapitre premier, section 1 de la partie TROIS](#). Ces questionnaires nous donnent un aperçu quantitatif de l'expérience utilisateur vécue par les usagers à l'utilisation des systèmes. Les deux questionnaires, SUS et SUE, sont disponibles pour consultation en annexe 4. Le questionnaire AttrackDif2 est lui, visible en figure 116.

Les conditions de la performance sont évaluées par l'intermédiaire du décompte des erreurs commises lors de l'assemblage et du temps passé pour les étapes de calibration et de production.

Nous souhaitons par ailleurs explorer le champ d'appréciation des critères du capacitant au travers d'un entretien avec le participant. Ici, l'objectif est de comprendre la position subjective de l'individu à l'évocation des subtilités inhérentes à certains critères du capacitant comme leur évaluation de leurs performances, leur marge de manœuvre ressentie, mais aussi les capacités instrumentales du système et la compréhension globale de ce dernier. L'entretien est composé de questions ouvertes, semi-ouvertes et fermées. L'évaluation subjective portée par l'individu sur lui-même doit venir compléter les observations effectuées sur le terrain par nous-même, d'un point de vue global mais aussi et surtout vis-à-vis de ces critères. Le questionnaire de l'entretien est disponible à la consultation en annexe 5.

Le protocole d'étude, les résultats des expérimentations et la discussion de autours de ces résultats seront l'objet du [chapitre premier de la partie TROIS](#) de ce manuscrit.

***Partie TROIS : MÉTHODOLOGIE HEURISTIQUE DE
CRÉATION D'ACTIVITÉS DE RÉALITÉ AUGMENTÉE
ET EXPÉRIMENTATION***

Chapitre premier : Recherches expérimentales en laboratoire

Section 1 Cadre expérimental et protocole

L'objet de la présente section de ce chapitre est d'explicitier le protocole mis en place pour réaliser notre étude en laboratoire. Par souci de rigueur, ce protocole a été soumis au CERGA (Comité d'Éthique pour la Recherche, Grenoble Alpes). Celui-ci a suivi un chemin de validation avec toutes les corrections nécessaires pour qu'il soit effectivement validé, du point de vue éthique mais aussi du point de vue de sa procédure de mise en application. L'avis du CERGA est disponible en annexe 6.

1.1.1 Rappel des objectifs

Les expérimentations effectuées ont deux objectifs : (1) montrer la pertinence de faire évoluer les caractéristiques techniques des appareils de réalité augmentée pour atteindre des niveaux de satisfaction des utilisateurs au travers de critères d'utilité, d'utilisabilité, et des dimensions UX ; et (2) valider les choix de conception des IHMs résultant eux-mêmes de leur mise en perspective au travers des critères du capacitant définis par les membres du laboratoire ACTé.

Les expérimentations doivent montrer que l'utilisation d'un dispositif ancien ou dépassé technologiquement, et d'une IHM conçue sans prise en compte des critères du capacitant rendent l'expérience utilisateur, la performance au poste et finalement l'acceptation de la nouvelle technologie plus difficile voire improbable. Lorsque l'on a considéré l'Humain durant la conception (ergonomie du dispositif, fiabilité et attractivité de l'IHM, habitude à la nouvelle technologie, etc...), on présume que l'acceptabilité peut être fortement accrue.

1.1.2 Rappel des hypothèses

Plusieurs hypothèses de recherche visent à être confirmées par les expérimentations :

La mise en perspective des critères du capacitant, au travers des critères de choix techniques retenus pour élaborer une nouvelle IHM, confirme la validité de ceux-ci. Plus précisément :

Critères 1 :

Le critère d'utilité est conditionné par la capacité qu'a le système à assister l'opérateur dans sa complétion des conditions d'assemblage selon la cadence imposée (performances). Nous pensons que le système (visiocasque + IHM) possédant les caractéristiques les plus récentes aura un impact positif sur l'utilité.

Le questionnaire USE permettra de vérifier ces hypothèses.

Le critère d'utilisabilité est déterminé par les critères dépendants : prévention des erreurs, facilité d'apprentissage, efficacité, mémorisation et sentiment de satisfaction. Nous supposons que l'IHM développée avec les critères du capacitant génèrera une efficacité supérieure sur le poste de formation.

Le questionnaire SUS permettra de vérifier ces hypothèses.

La sensibilité à représente les aspects hédoniques de l'expérience utilisateur nommés affects. Ceux-ci sont directement liés aux caractères hédoniques d'identification et de stimulation. La *sensibilité à* prend la forme d'une expérience « de plaisir ou de peine » qui permettrait de dégager une tendance d'appétence à l'utilisation du dispositif.

Les aspects hédoniques de la nouvelle IHM seront considérés comme supérieurs à ceux de l'ancienne IHM. Le questionnaire AttrackDif2 permettra de vérifier cette hypothèse.

Critère 2 :

Le critère de MMS (Marge de Manœuvre Situationnelle) est un critère qui ouvre les possibilités d'action pour l'opérateur de procéder à un séquençage des tâches selon ce qu'il peut considérer comme plus efficient, plus performant, plus rapide, etc...Encore faut-il qu'il sache qu'il ait ce pouvoir.

Nous faisons l'hypothèse pour ce critère que l'information, à l'opérateur, de ce pouvoir, sera certaine dans le cas de notre nouvelle IHM et improbable dans le cas de l'ancienne IHM.

Critères 3 :

Le critère de transparence opérative permet la compréhension et l'anticipation par l'opérateur, des interactions et des comportements du système. Nous faisons l'hypothèse que la transparence de l'IHM développée avec ce critère sera bien plus compréhensible que l'ancienne.

Le critère d'instrumentalisation permet à l'opérateur de modifier les attributs du système suivant la situation qu'il rencontre en situation de production/formation. Nous supposons ici, que l'IHM développée avec ce critère aura un impact positif sur la capacité qu'a l'opérateur à ajuster le système à ses désidératas du moment.

Les critères 2, 3.a et 3.b font l'objet d'une évaluation qualitative basée sur l'observation pendant les passations et lors des entretiens avec les participants où des questions spécifiques sur ces trois critères sont posées.

Sur la base des hypothèses explicitées dans la figure 88 que nous évoquons au [chapitre premier de la partie DEUX](#), la conduite de l'étude expérimentale prospecte la pertinence des critères du capacitant associés à une HLI d'Identification. La figure 117 montre les critères du capacitant examinés au cours de l'étude expérimentale dont les résultats sont évoqués dans ce chapitre. Les éléments d'enquête sont marqués d'un cercle rouge avec un point interrogatif à l'intérieur.

1.1.3 Méthode expérimentale

L'objectif de l'expérience est d'assembler les 4 composants (clips, coulisse et cordelette) sur la pièce principale (glace de custode). Le visiocasque a pour objectif d'assister le participant à assembler correctement les composants sur la pièce principale (points d'attention particuliers, sens de montage).

Deux tables situées respectivement à gauche et à droite de la réplique du poste de formation seront disposées de façon à symboliser le bac d'où arrive la pièce, en amont du processus de formation (table de gauche), et le bac de conditionnement du sous-ensemble monté (table de droite).

Description de la procédure pour un participant :

Le scénario prévu consiste à former un individu sur un poste de formation existant sur le site industriel d'un équipementier automobile. L'objectif est d'apprendre à assembler 4 pièces (clip noir, clip blanc, coulisse et cordelette) sur un sous-ensemble (glace de custode d'un véhicule) et de le conditionner dans un bac prévu à cet effet, à l'aide d'un visiocasque de réalité augmentée. Nous considérons deux phases pour cette expérimentation : une première phase en *back-office* permettant l'habituation aux gestes utiles à la technologie (*AirTap*, utilisation du *clicker*, etc.). Une seconde phase, de calibration et de production sur la réplique d'un poste de travail utilisé dans l'industrie automobile.

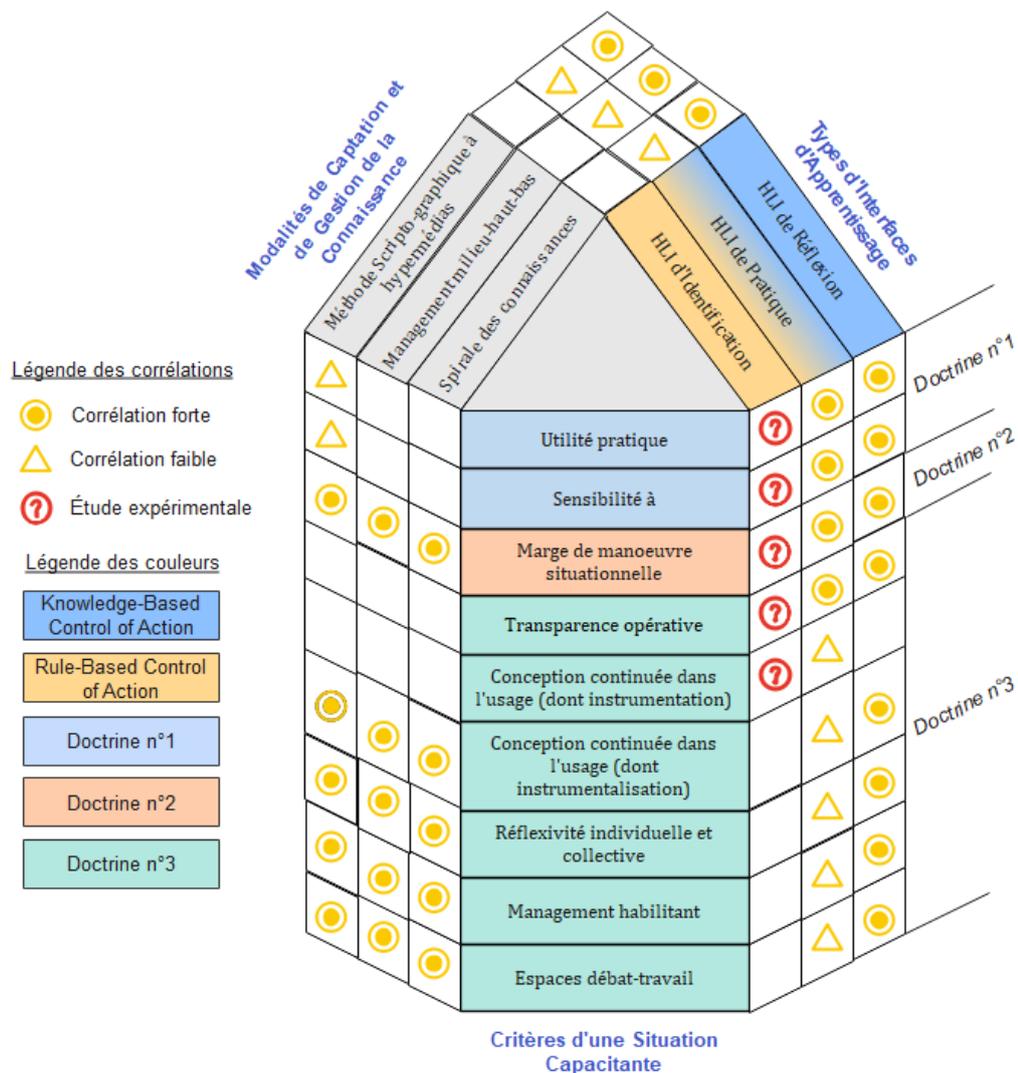


Figure 117: Corrélation effective ou non ? Évaluation de la pertinence des critères de capacitant par rapport à une HLI d'Identification. Les marques rouges prospecteront ce lien éventuel.

Avant toutes choses : L'accueil du participant permettra à celui-ci de connaître les modalités d'expérimentation, et permettra de le connaître lui.

Nous expliquons tout d'abord aux participants l'objectif de l'expérimentation et la manière dont celle-ci se déroule. Nous répondons à toutes les questions que ceux-ci peuvent se poser alors. Il remplit ensuite un formulaire de consentement et un formulaire socio-démographique, nommé « Questionnaire préliminaire », tous deux disponibles en pages annexes à ce protocole.

Phase d'apprentissage : Utile pour ajuster le casque sur la tête du participant avec l'aide d'un ingénieur (Sergio Camilo MEDINA GALVIS), calibrer le système oculaire de projection des hologrammes (il faut que le visiocasque ajuste la distance inter pupillaire entre autres) et ajuster le niveau sonore général.

Sont lancés par la suite, quelques petits jeux permettant de se familiariser avec le système de clic virtuel (nommé *AirTap*) mais aussi l'utilisation du *clicker* physique si demandé par le participant. Ces petits jeux ont pour vocation de permettre à l'individu de sélectionner et de manipuler des objets virtuels dans l'espace, de découvrir la technologie de réalité augmentée éventuellement.

Quelques points de définition inhérentes à certaines technologies de l'Hololens 2 viennent parfaire cette phase d'apprentissage, notamment la *Virtual Hand* et le pointage en profondeur par *Ray-Cast*.

Phase de calibration : L'objectif de cette phase est déjà de mesurer l'écart de performance entre les dispositifs technologiques et les IHMs. Pour le participant, cela revient à superposer l'environnement virtuel sur l'environnement réel afin de *calibrer* la position et l'orientation des éléments virtuels qui sont affichés par la suite. C'est en fait, une mise en référence du système de coordonnées virtuelles au système de coordonnées réelles du poste de formation.

Sur l'IHM Rouge, il faut, pour le participant, positionner (translation & orientation), à l'aide du visiocasque et d'un clavier annexe, un cube blanc sur la patte arrière du poste de travail. Pour l'IHM Bleue, il faut lire un QR-Code disponible à un endroit spécifique du poste de travail.

Le passage à l'étape suivante, la phase de formation proprement dite, se fera à l'aide d'un bouton dédié sur l'ancienne IHM, automatiquement dans le cas de la nouvelle IHM.

Ici, l'enregistrement vidéo égocentrique (enregistrement de ce que voit l'individu dans le visiocasque de RA), est lancé. Il permet d'analyser *a posteriori* les comportements de l'individu avec l'IHM et le visiocasque de réalité augmentée. Cet enregistrement ne permet pas de voir le visage de l'individu puisque l'on ne voit que sa(ses) main(s) ni d'entendre sa voix car nous pouvons contrôler le type de donnée que l'on souhaite enregistrer depuis l'ordinateur.

Phase de production : Phase de formation à l'assemblage des composants sur la pièce principale (la glace de custode) à l'aide d'un triptyque d'éléments virtuels : animations 3D, vidéos de démonstration, et conseils audio-visuels.

Dans l'IHM Rouge, cette phase de formation est scindée en deux : une première sous-phase pendant laquelle l'opérateur étudie les informations provenant de l'IHM. Puis une seconde sous-phase où l'opérateur se sert des informations reçues préalablement et du triptyque énoncé plus haut pour monter le sous-ensemble.

Dans l'IHM Bleue, pas de sous-phase, l'IHM déploie au fur et à mesure le triptyque d'informations tout en laissant la liberté à l'opérateur de s'y intéresser ou non.

La mesure des performances (temps et défauts d'assemblage observés) au poste est gérée automatiquement en arrière-plan (ou non, suivant les souhaits du participant) dans la nouvelle IHM. Pour l'IHM Rouge, le responsable scientifique devra chronométrer le temps lui-même et effectuer l'analyse des défauts d'assemblage par une vérification en temps réel ou *a posteriori*, grâce à l'enregistrement vidéo.

Dans les deux conditions et quelques soient les cas expérimentés, aucune aide ne sera apportée aux participants afin de ne pas biaiser l'expérimentation, l'objectif étant que, normalement, c'est le dispositif de réalité augmentée qui est utile à cette tâche. Chaque condition a une durée maximale de 17 minutes, ce qui est suffisant d'après les pré-tests réalisés précédemment pour compléter chaque condition. Si toutefois, le participant a terminé avant ces 17 minutes impartis, l'expérience passe alors à l'étape suivante.

Suite à chaque condition, un questionnaire de satisfaction à l'usage (constitué d'échelles de Likert allant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord ») est donné au participant afin de mesurer l'appétence pour la tâche en regard de l'aide apportée par le dispositif de RA et l'IHM afférente. Enfin, un entretien enregistré d'environ 10 minutes est effectué avec le participant afin de creuser plus encore l'expérience utilisateur vécue par celui-ci lors de cette expérimentation. Nous posons des questions sur l'expérience utilisateur vécue par le participant que nous mettons en perspective avec les critères du capacitant : performances, MMS, transparence opérative et instrumentalisation. Ces questions ont une valeur subjective que nous pouvons réutiliser par la suite sous forme de « verbatims ».

Durée de l'expérience pour un opérateur :

Chaque participant sera invité pendant 1h19 environ :

- 10min pour l'introduction et la complétion du consentement et du questionnaire socio-démographique.
- 10min pour la formation.
- 17min pour la passation de la 1ère condition.
- 5min pour la complétion des questionnaires en ligne.
- 17min pour la passation de la 2nde condition.
- 5min pour la complétion des questionnaires en ligne.
- 15min pour l'entretien avec le participant.

Analyse des données :

Des données quantitatives, relatives à la performance au poste sont lancées directement dans l'IHM du dispositif de Réalité Augmentée. Ces mesures de performances seront par ailleurs disponibles pour l'utilisateur qui choisira s'il veut, ou non, les afficher dans l'interface. Il y a deux types de données quantitatives : le temps passé à calibrer puis à opérer les instructions de montage d'une part, et le nombre d'erreurs commises par l'individu au cours de la tâche globale d'autre part.

Côté données qualitatives, celles-ci sont extraites des deux questionnaires de satisfaction remplis après complétion de chaque condition et de l'entretien final avec l'individu.

I.1.4 Données socio-démographiques des participants

L'étude expérimentale a permis de faire tester les systèmes sur 31 participants. Parmi ceux-ci, 10 sont des femmes, représentant 32% de la population totale soit un tiers du panel des individus (fig.118).

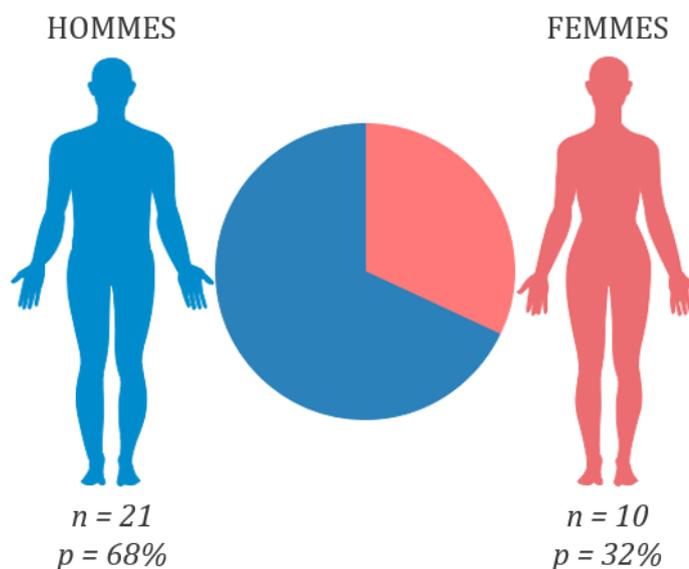


Figure 118: Répartition Hommes/Femmes dans l'étude expérimentale.

Du point de vue des classes d'âge, on remarque (fig.119) que 7 personnes étaient âgées de 18 à 22 ans avec un âge moyen de 21,4 ans. Cet échantillon de population représente 22,5% de la population globale.

La classe d'âge 23-26 ans compte 12 individus avec un âge moyen de 24,8 ans et représente une part importante de 39% de la population globale.

7 personnes composent la classe d'âge 27-44 ans avec un âge moyen de 29 ans et représente une part importante de 22,5% de la population globale.

Enfin, nous avons pu faire passer l'étude expérimentale auprès de 5 personnes âgées de 45 ans ou plus. L'âge moyen de l'échantillon est de 53,6 ans et cette classe d'âge représente 16% de la population globale.

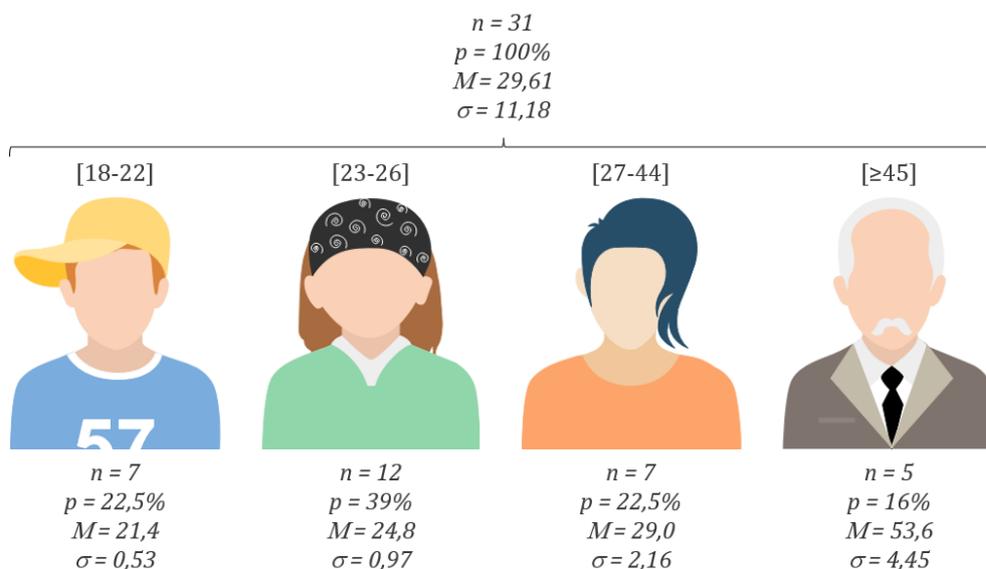


Figure 119: Répartition par classe d'âge dans l'étude expérimentale.

Les opinions des participants (prises en amont des expérimentations) vis-à-vis de la technologie de RA sont plutôt positives (fig.120). En effet, 26 individus ont un avis légèrement positif à très positif de ces technologies. En revanche 5 personnes ont une vision neutre de la RA, ni positive, ni négative.

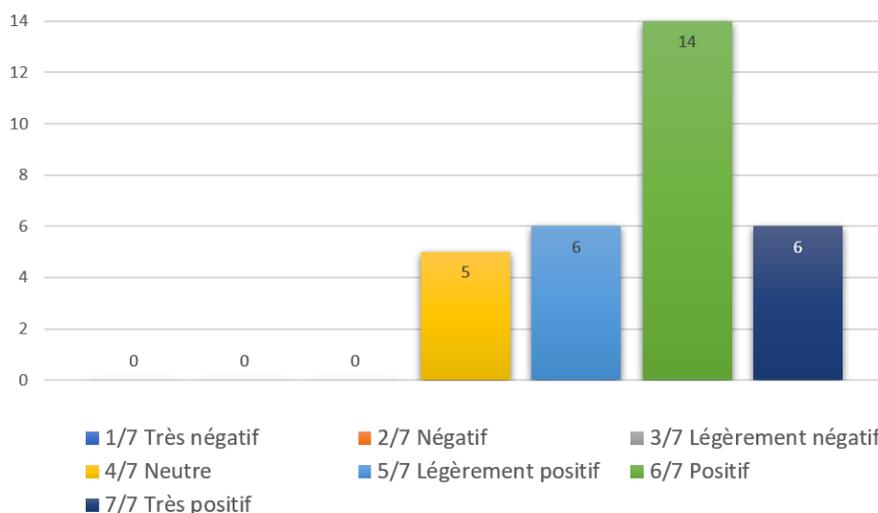


Figure 120: Répartition des opinions sur les technologies de RA des participants de l'étude expérimentale.

L'expérience des individus des technologies de RA est globalement faible voire inexistante (fig.121). Seules 5 personnes ont utilisé la RA au moins plusieurs fois. Un tiers des participants ont aucune expérience de la RA (10/31) et un tiers des personnes ont utilisé une fois ou deux la RA (10/31).

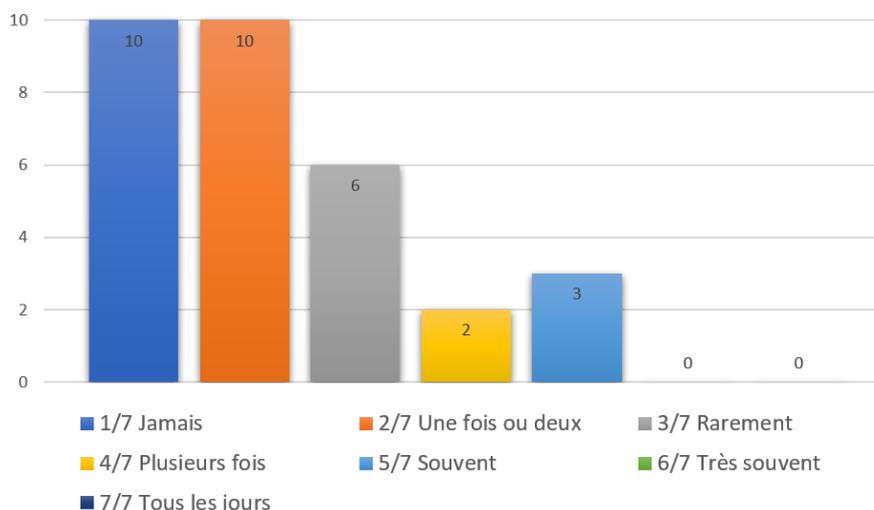


Figure 121: Répartition des expériences de la RA parmi les participants de l'étude expérimentale.

I.1.5 Rappel des définitions des différentes dimensions mesurées

Dans leur livre (**Lallemand and Gronier, 2018**), Lallemand et Gronier définissent les dimensions de l'UX selon ces termes :

- **Utilisabilité** : Le produit est facile à utiliser et ne demande pas d'efforts ;
- **Utilité** : Le produit à une fonction importante [pour l'utilisateur], il est pratique ;
- **Attractivité** : Le produit est interactif et intéressant [aux yeux de l'utilisateur] ;
- **Stimulation** : Le produit stimule la curiosité et permet d'apprendre des choses nouvelles ;
- **Identification** : Le produit communique une image positive [vis-à-vis d'autrui].

Il est important de garder à l'esprit les subtilités inhérentes à ces dimensions dans la réaction que peut avoir l'utilisateur durant la situation de collaboration Homme-Machine. En effet, celles-ci peuvent avoir un impact en fonction du système étudié d'une part, et de l'appétence/expérience pour/de la RA en fonction de l'individu, notamment les dimensions d'identification, et de stimulation. Par ailleurs Lallemand et Gronier (**Lallemand and Gronier, 2018**) considèrent les dimensions UX, pragmatique et hédoniques en ces termes :

- **Qualités Pragmatiques** : « décrivent l'utilisabilité du produit et indiquent à quel point elles permettent aux utilisateurs d'atteindre leurs buts (dans le sens de réaliser une tâche) » ;
- **Qualités Hédoniques** : « indiquent dans quelles mesures le produit permet à l'utilisateur de s'identifier à lui et soutient le besoin de stimulation ».

Section 2 Résultats obtenus et discussion

I.2.1 Introduction

Cette section explicite les résultats inhérents à notre étude expérimentale. Le détail des résultats de l'expérience utilisateurs vécue par les usagers tant du point de vue des performances, que des affects sont présentés puis discutés en fin de section 2.

I.2.2 Comparaison des UX vécues par rapport aux permutations effectuées

La figure 115 du [chapitre III de la partie DEUX](#) explique les conditions de passation des études expérimentales par participant : Le test de deux systèmes, dont l'ordre est aléatoire. Cet ordre aléatoire permet d'une part de vérifier, par effet de comparaison, si le passage du système rouge (« ancien ») vers le système bleu (« récent ») ou sa réciproque a un impact. Pour mesurer ces permutations, émettons les hypothèses que si un système dit « récent » est testé avant son pendant « ancien », ce dernier souffre beaucoup plus de la comparaison que dans le cas d'un test réciproque à cette hypothèse : c'est ce que nous mettons en perspective à l'aune des facteurs de motivation et de démotivation (ou facteur d'hygiène) extraits des travaux de Herzberg ([Louart, 2002](#)).

L'objet de ce paragraphe est d'inspecter les résultats obtenus à l'aune de l'ordre de passage de tel système par rapport à tel autre dans l'étude expérimentale : S1 versus S2, S2 versus S1, S2 versus S3, ou S3 versus S2. Étudions les quatre conditions de passation d'expérimentations qui sont conférées par nos hypothèses.

I.2.2.1 Condition de passation : Système 1 puis système 2

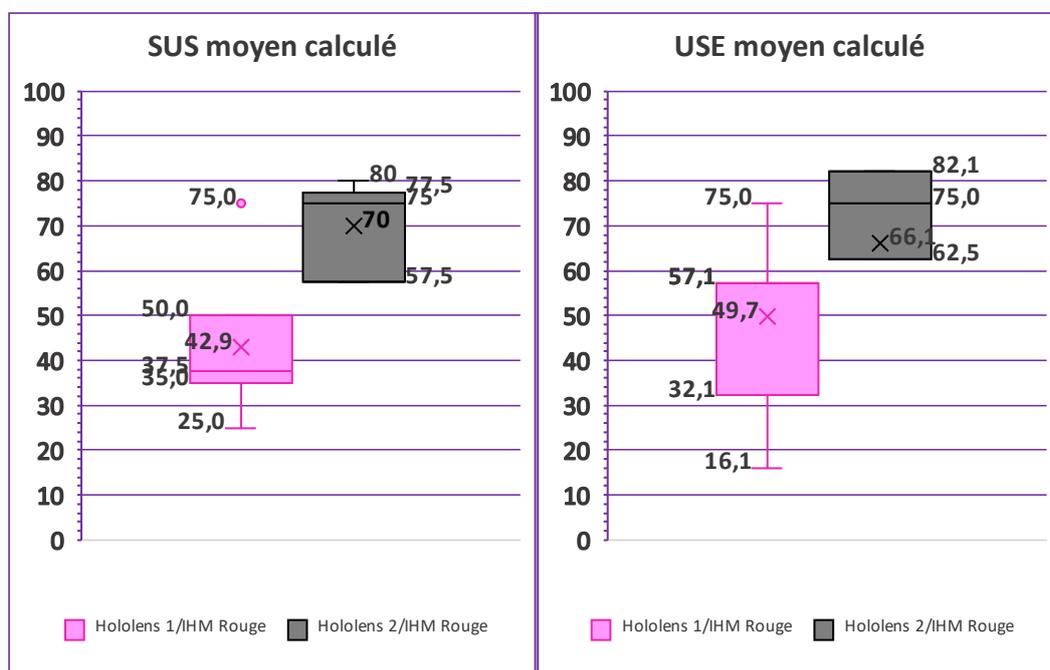


Figure 122: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S1 (Hololens1/IHM Rouge) puis S2 (Hololens 2/IHM Rouge).

Les résultats inhérents à cette condition de passation montrent une supériorité de perception de l'utilisabilité comme de l'utilité de la part des usagers (fig.122). En effet, la valeur moyenne relevée dans les deux questionnaires SUS et USE pour le système 2 sont

supérieurs à ceux du système 1. La volatilité des résultats est cependant grande dans S1 pour l'utilité perçue : $16,1 \leq amplitude_{S1} \leq 75,0$, tandis que S2 est ramassé autour quart supérieur de l'échelle USE : $62,5 \leq amplitude_{S2} < 82,1$.

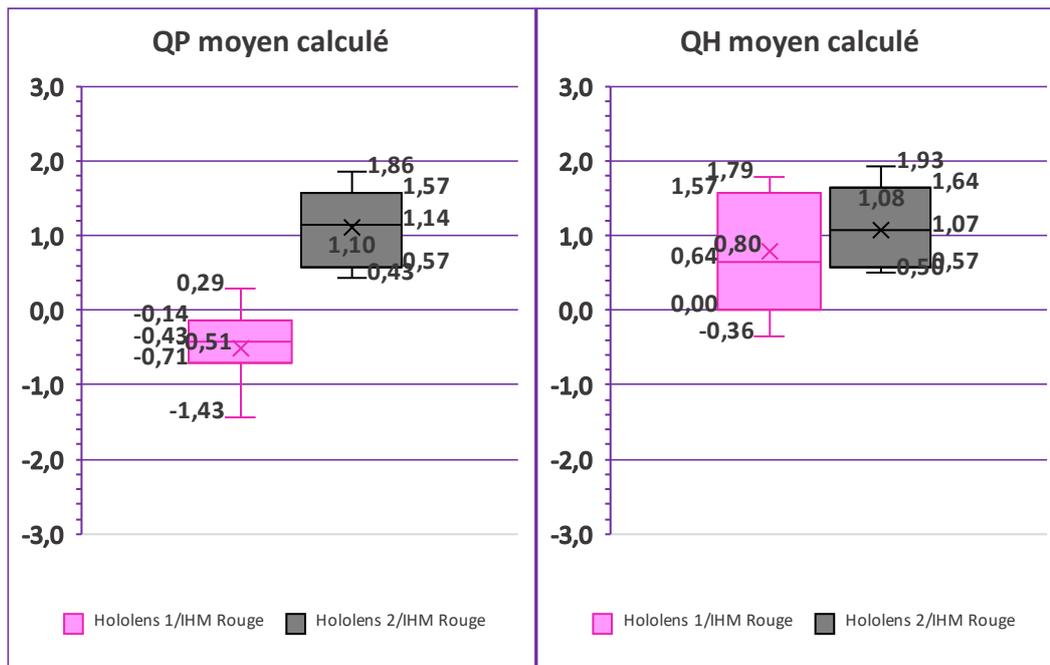


Figure 123: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S1 puis S2.

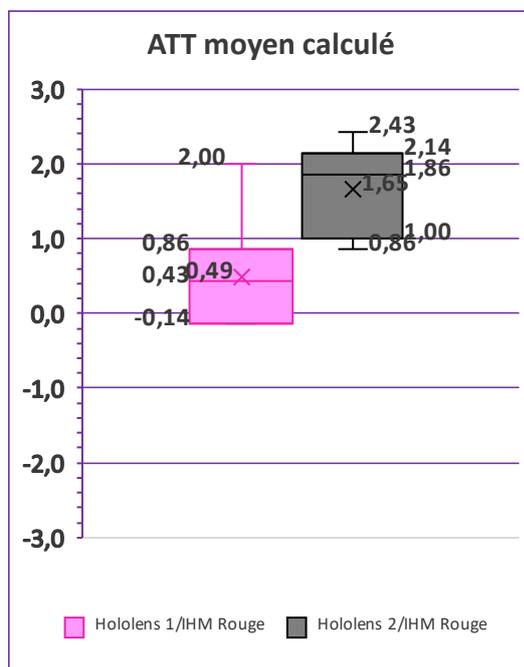


Figure 124: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S1 puis S2.

Les qualités pragmatiques évaluées dans le questionnaire AttrackDif2 ayant de fortes similarités avec le questionnaire SUS, nous retrouvons de la même façon que précédemment, une supériorité du système 2 sur le système 1 (fig.123). En revanche, il est intéressant de noter que les qualités hédoniques sont, elles, relativement identiques

bien qu'il existe une disparité plus importante dans la boîte de Tukey du système 1. La moyenne est supérieure mais le dernier quartile de S1 ($1,57 < Q_{4S1} < 1,79$) est quasiment égal à celui de S2 ($1,64 < Q_{4S2} < 1,93$). L'IHM jouerait-elle un rôle prépondérant dans les qualités hédoniques perçues ? (Rappelons que dans la condition S1 versus S2, nous sommes à ISO-IHM et que nous faisons varier les visiocasques).

L'attractivité mesurée des systèmes (fig.124) est ici encore en faveur du visiocasque possédant les caractéristiques les plus récentes. L'amplitude totale des résultats de S2 est supérieure aux trois premiers quartiles de S1. Ceci révèle une attractivité supérieure du visiocasque Hololens 2 sur l'Hololens 1. Sont-ce les métaphores d'interaction nouvelles ou l'architecture du visiocasque qui influent sur cette perception par les participants ?

I.2.2.2 Condition de passation : Système 2 puis système 1

Dans l'ordre de passage inverse à celui du paragraphe précédent, les perceptions d'utilisabilité et d'utilité sont relativement identiques entre les deux systèmes (fig.125). L'utilisabilité moyenne de S2 est presque identique à celle de S1 (resp. : 48,2 versus 42,1). L'utilité perçue est identique entre les deux systèmes tant dans les moyennes (58,2 pour S2 versus 51,5 pour S1) que dans les amplitudes des boîtes de Tukey : $32,1 \leq amplitude_{S2} \leq 80,4$ versus $30,4 \leq amplitude_{S1} \leq 75,0$.

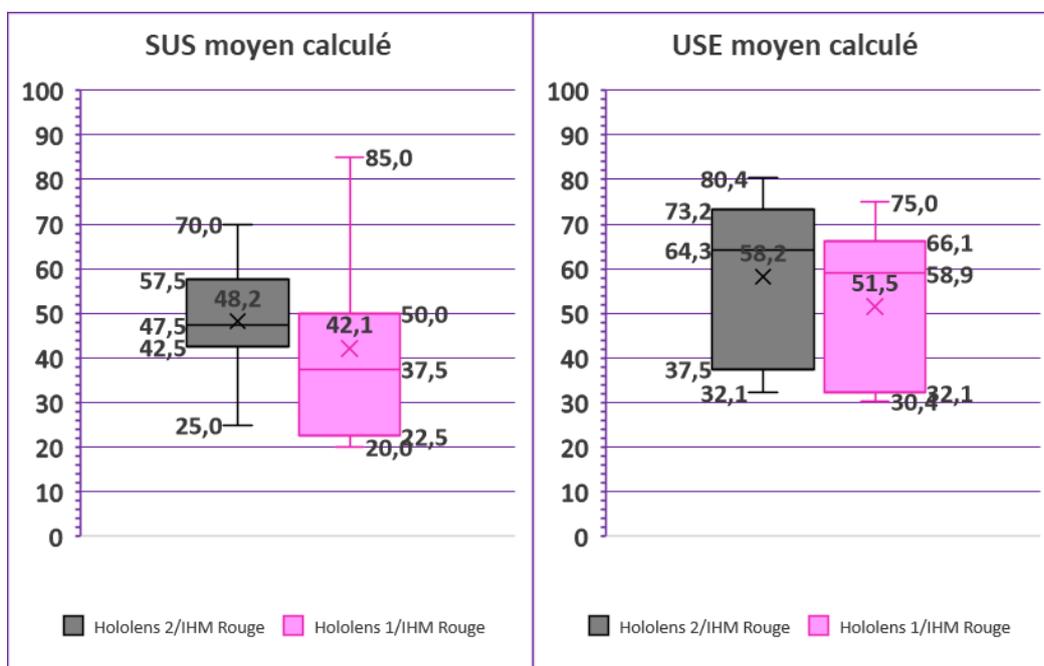


Figure 125: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S2 puis S1.

Les qualités pragmatiques et hédoniques perçues ne révèlent là aussi, pas de différence notable (fig.126). Les deux systèmes sont perçus de la même manière avec toujours une supériorité de S2 sur S1. Les amplitudes sont grandes sur S1 tant du point de vue des qualités pragmatiques $-1,29 \leq amplitude_{QPS1} \leq 0,86$ que du point de vue des qualités hédoniques $-1,50 \leq amplitude_{QHS1} \leq 1,00$. Pour le système 2, il est intéressant de noter que les usagers semblent percevoir une différence entre ce système et S1 dans la dimension pragmatique, c'est moins évident du côté des qualités hédoniques. En effet, les amplitudes sont très faibles au niveau des qualités pragmatiques de S2 $-0,43 \leq amplitude_{QPS2} < 1,14$, mais très importantes au niveau des qualités pragmatiques de S2 $-0,93 \leq amplitude_{QHS2} \leq 1,71$.

L'attractivité globale mesurée pour les deux systèmes ne révèlent rien sinon une très faible supériorité de S2 sur S1 (fig.127) avec une valeur moyenne de 0,53 versus -0,47, ce qui est médiocre pour les deux systèmes. De plus, les amplitudes étant très importantes, il semble se dégager un réel désappointement de la part des usagers, qui ont manifestement du mal à établir une perception claire de l'attractivité de S1 et S2.

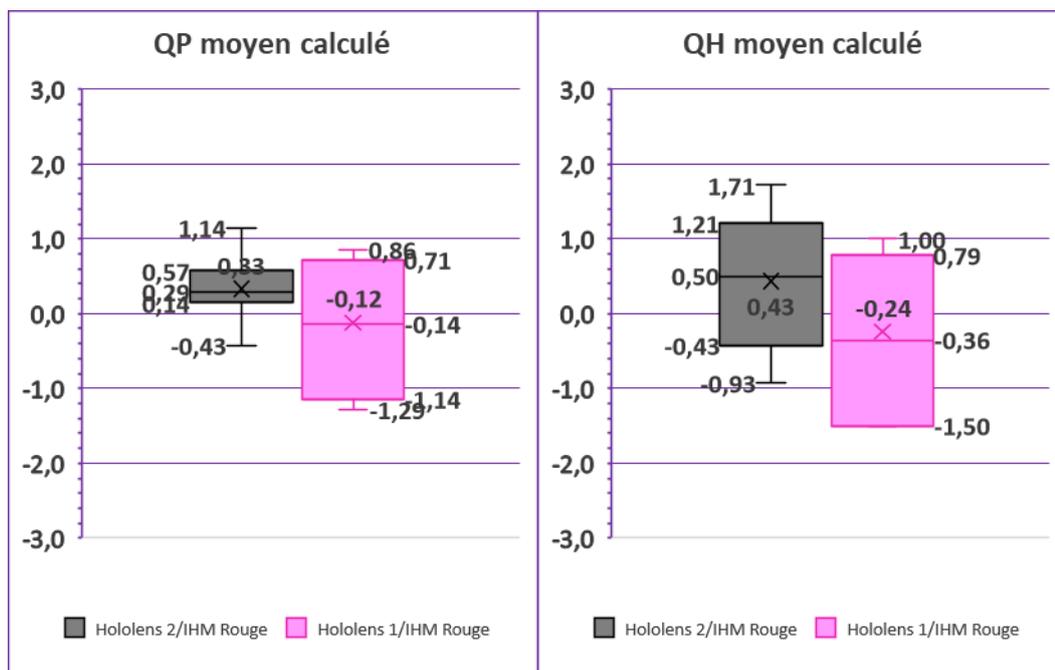


Figure 126: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S2 puis S1.

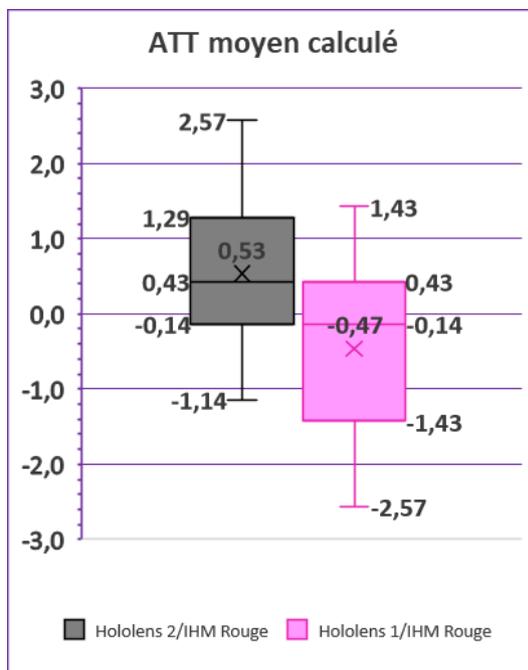


Figure 127: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S2 puis S1.

Étant donné l'ordre de passage (S2 puis S1), le système S1 souffre moins de l'effet de comparaison que dans l'ordre de passage précédent (S1 puis S2). Les usagers ont évalué S2 sans connaître S1 et les résultats montrent qu'en l'absence de cet effet comparatif,

les deux systèmes ont une perception mesurée équivalente dans toutes les dimensions UX même si S2 reste toujours supérieur à S1.

1.2.2.3 Condition de passation : Système 2 puis système 3

L'évaluation de S2 puis de S3 consiste à considérer les perceptions des usagers à l'aune du changement d'interface Homme-Machine. Côté Rouge, l'ancienne IHM (dite Rouge), côté bleu, la nouvelle IHM (dite Bleue).

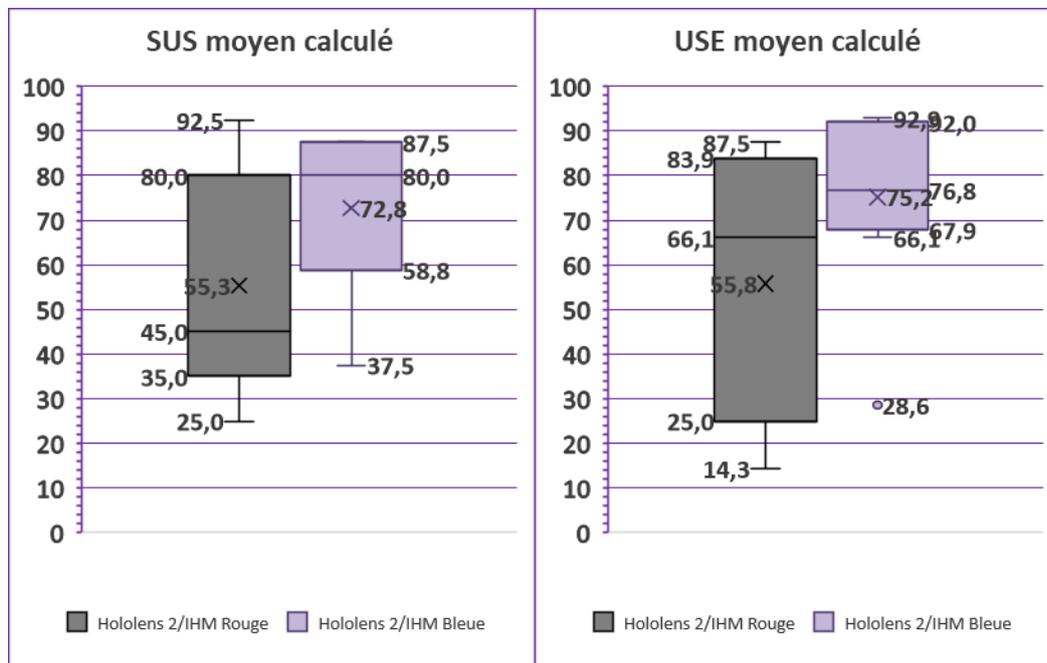


Figure 128: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S2 (Hololens 2/IHM Rouge) puis S3 (Hololens 2/IHM Bleue).

Le mesure des dimensions utilisabilité/utilité (fig.128) montre une similarité entre les deux systèmes notamment dans le cas de l'utilisabilité. Une amplitude forte est relevée dans le cas de S2 dans les deux dimensions, les usagers de cette condition de passage semblant circonspects sur leur vision du système 2. On peut toutefois noter les très bons scores SUS et USE de S3 (72,8 au SUS et 75,2% à l'USE). Enfin, il est notable que l'utilité de S3 est perçue très favorablement. En effet, l'amplitude de S3 dans cette dimension est relativement ramassée autour du tiers supérieur : $66,1 \leq amplitude_{USES3} \leq 92,9$.

Les qualités pragmatiques et hédoniques de S3 sont supérieures à S2 (fig.129). L'augmentation par effet de comparaison est plus nette dans la dimension QP (Qualités Pragmatiques), 75% des usagers considérant S3 supérieur au 4^{ème} quartile de S2 : $0,79 \leq amplitude_{QPS2} \leq 2,29$ versus $0,64 \leq amplitude_{QPS1} \leq 1,57$. La dimension QH (Qualités Hédoniques) est plus nuancée même si les usagers considèrent S3 comme possédant de bonnes qualité hédoniques, l'intégralité de ceux-ci plaçant le système au-dessus de 1/3, ou si l'on considère l'échelle UX dans son ensemble (de -3 à +3 soit une notation sur 7), au-dessus de 5/7. S2 est cependant considéré comme plutôt bon, même si sa limite basse si situe en dessous de la valeur moyenne de 0.

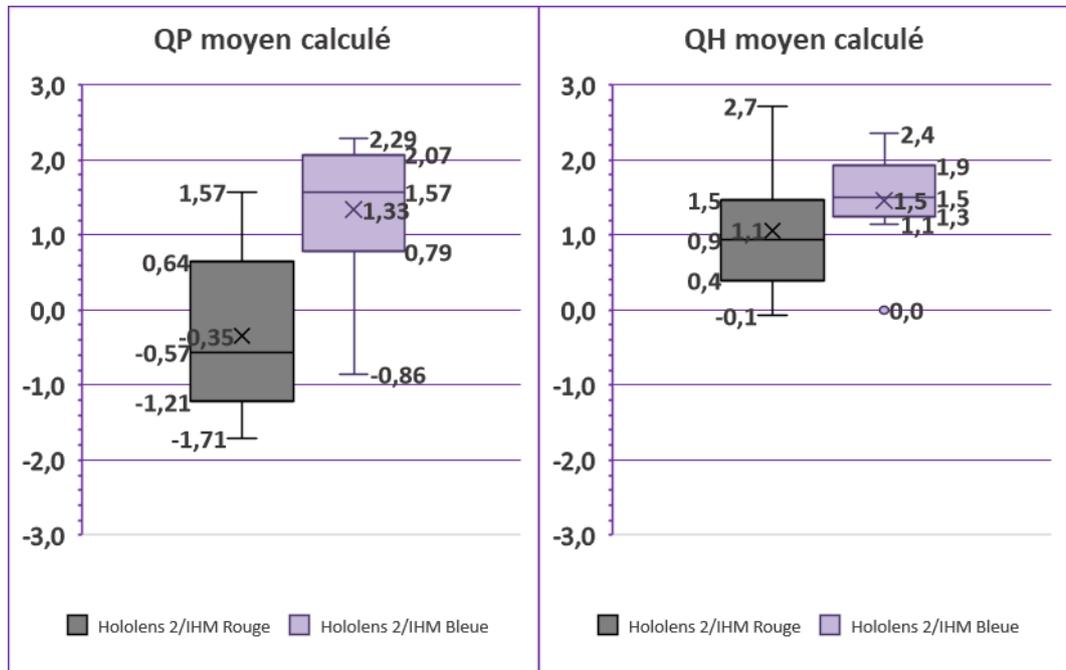


Figure 129: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S2 puis S3.

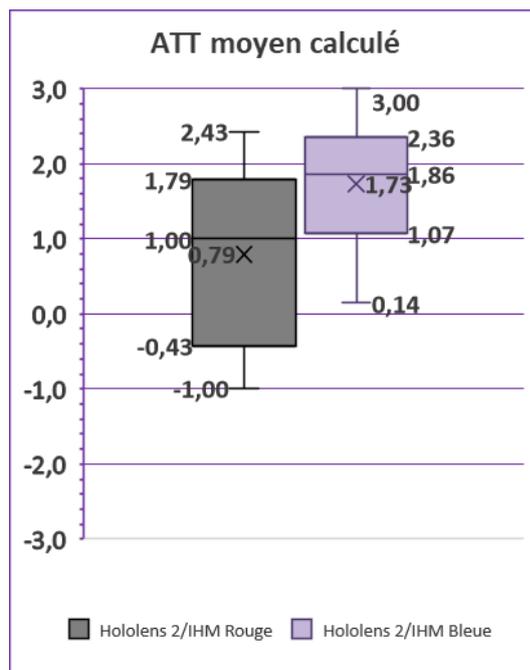


Figure 130: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S2 puis S3.

L'attractivité des deux systèmes est plutôt correctement perçue par les individus avec une nette supériorité de S3 sur S2 (fig.130). L'amplitude de S2 révèle une difficulté des usagers dans la considération de celui-ci du point de vue de l'attractivité : $-1,00 \leq amplitude_{ATT_{S2}} \leq 2,43$. Dans l'ensemble, S2 résiste bien à la comparaison avec S3 même si ce dernier est supérieur dans toutes les dimensions mesurées. Si l'on considère S2 dans cet ordre de passage (S2 puis S3) avec le même ordre de passage mais en comparaison avec S1 (S2 puis S1), on voit que ces usagers perçoivent ce système de façon sensiblement

équivalente (USE : 55,8 *versus* 58,2 ; QP : 0,33 *versus* -0,35 ; ATT : 0,79 *versus* 0,53). Il ne semble donc pas y avoir de biais entre l'étude de l'évolution des visiocasques et l'étude des IHMs.

I.2.2.4 Condition de passation : Système 3 puis système 2

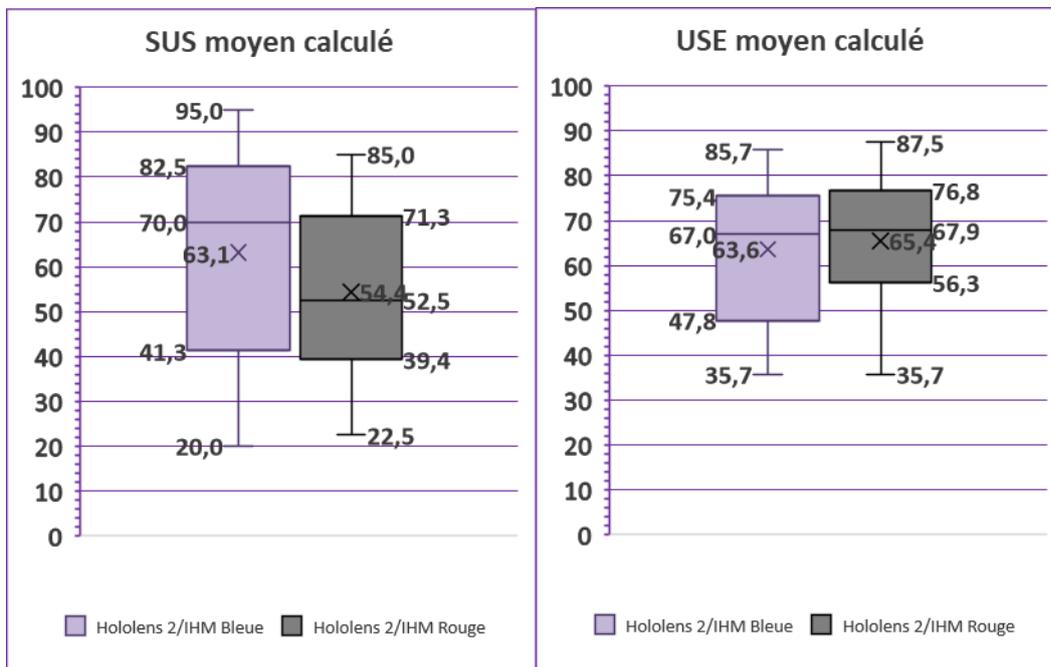


Figure 131: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S3 puis S2.

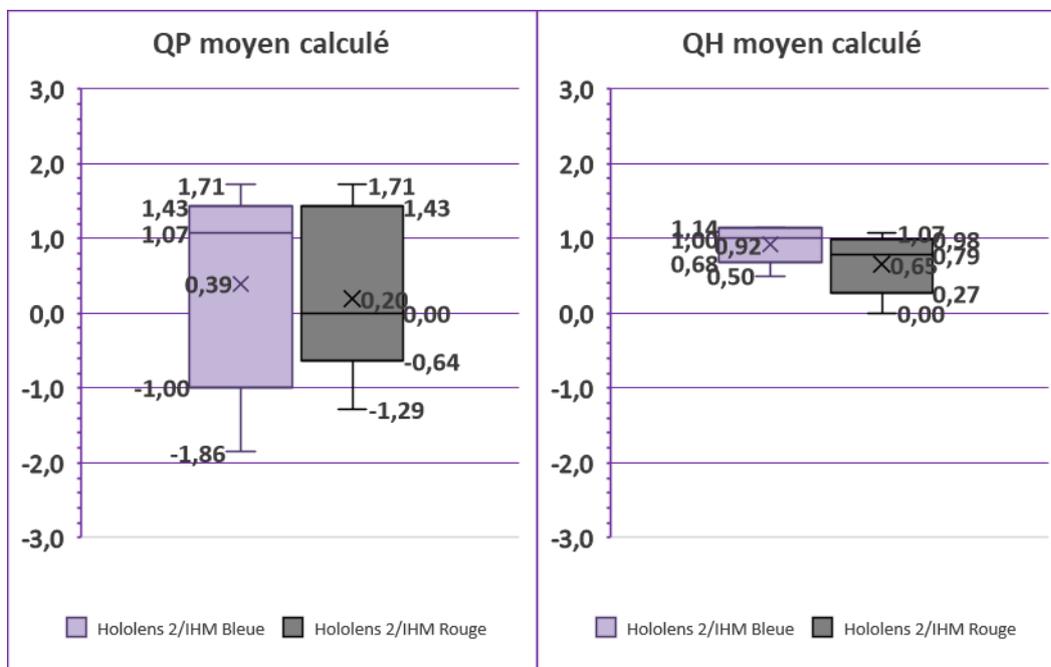


Figure 132: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S3 puis S2.

Dans cet ordre de passage, le système 2 souffre moins de l'effet comparatif. En effet, les utilisateurs ont tendance et ce, pour toutes les dimensions, à considérer les systèmes comme équivalents bien que S3 soit plus agréablement perçu que S2. Notons la quasi-égalité des deux systèmes au niveau de la dimension d'utilité (fig.131). Par rapport à l'ordre de passage évoqué au paragraphe précédent, la perception de l'utilité de S2 par rapport à S3 est même en augmentation : 55,8 *versus* 65,4.

Dans les dimensions UX pragmatique et hédonique (fig.132), les deux systèmes sont ici encore équivalents bien que la perception des individus du système 3 est supérieure à celle de S2. Les qualités pragmatiques sont considérées variablement suivant les usagers, l'amplitude pour les deux systèmes étant très importantes.

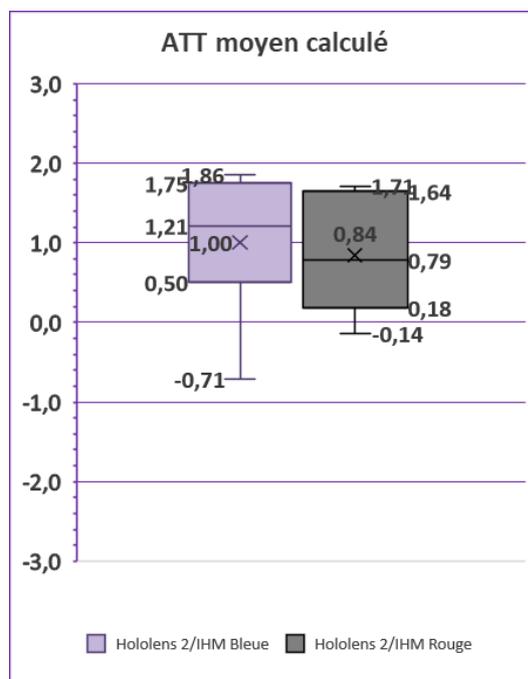


Figure 133: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S3 puis S2.

L'attractivité globale perçue est à l'avenant des autres dimensions (fig.133), équivalente entre les deux systèmes. Il existe une plus forte disparité de perception de la part des participants sur S3 que sur S2. Finalement, l'IHM Rouge tient bien la comparaison avec l'IHM bleue dans cet ordre de passage.

1.2.3 Évaluations globales par système considéré

L'évaluation faite des systèmes en fonction des ordres de passage explicitées ci-dessus sont résumées du point de critères du capacitant d'utilité (utilisabilité + utilité pratique) en figure 134. Rappelons que nous considérons au [chapitre III de la partie DEUX](#), que les systèmes testés, en regard d'un ordre de passage de l'ancien vers le récent croîtrait d'un coefficient n tandis que l'inverse ferait décroître les valeurs d'un coefficient p , avec $n > p$. Les résultats valident ces deux hypothèses et les coefficients associés sauf dans le cas de l'utilité pour le changement d'IHM. En effet, dans ce cas, l'évolution n'est pas négative et même très légèrement positive (+3%). La valeur est cependant trop faible pour que l'on puisse affirmer le contraire.

De plus, les coefficients d'évolution lors des changements de visiocasques sont plus importants que lorsque l'on change d'IHM dans la dimension d'utilisabilité (63% contre 32%). Dans celle d'utilité, il y a cependant équivalence (33% contre 35%).

Finalement, dans ce cas d'espèce, nous pouvons statuer sur l'intérêt de la maturité du dispositif interactif sur l'utilisabilité globale perçue par les usagers. L'utilité globale est plus complexe à appréhender. Elle semble se nourrir à la fois de la maturité technologique du visiocasque (métaphores d'interaction plus naturelles, architecture, design, etc.) et à la fois de l'IHM et des spécificités qu'elle offre.

Le passage d'un dispositif plus récent à un autre plus ancien comme d'une IHM aux critères du capacitant vers une IHM sans critère du capacitant sont équivalents. Il ne semble pas exister de lien entre le dispositif interactif, l'IHM et un quelconque facteur de démotivation ou d'hygiène. En effet, la chute au SUS en fonction du changement de matériel comme du changement d'IHM est équivalent : -13% au changement de visiocasque *versus* -14% au changement d'IHM. Un matériel (visiocasque ou IHM) plus ancien ne démotive pas plus un individu en cours de formation qu'un matériel récent.

Comp. de l'évolution moyenne du SUS (Utilisabilité)							
Comparaison des Systèmes			Comp.Valeurs.Moyennes			Moy.Évolutions	
Hyp.2	Système 1		Système 2	42,9		70,0	63
Hyp.2	Système 2		Système 3	55,3		72,8	32
Hyp.3	Système 2		Système 1	48,2		42,1	-13
Hyp.3	Système 3		Système 2	63,1		54,4	-14

Comp. de l'évolution moyenne du USE (Utilité)							
Comparaison des Systèmes			Comp.Valeurs.Moyennes			Moy.Évolutions	
Hyp.2	Système 1		Système 2	49,7		66,1	33
Hyp.2	Système 2		Système 3	55,8		75,2	35
Hyp.3	Système 2		Système 1	58,2		51,5	-11
Hyp.3	Système 3		Système 2	63,6		65,4	3

Figure 134: Comparaison du critère d'utilité en fonction des ordres de passage et des hypothèses formulées.

Les hypothèses 2 et 3 ont été testées sur les dimensions pragmatique, hédonique et d'attractivité des systèmes. Les résultats sont visibles en figure 135. Ici, nous voyons une forte corrélation entre le visiocasque et la perception des usagers de ces dimensions UX, dans le cas d'un passage d'un dispositif récent à un dispositif ancien. En effet, lors du changement de visiocasque, on note une chute de ces dimensions très élevée (-136% pour les qualités pragmatiques, -156% pour les qualités hédoniques, et même -189% pour l'attractivité perçue). Le changement d'IHM produit des effets bien moins notables. Par ailleurs, nous voyons des coefficients de démotivation supérieurs aux coefficients de motivation sur presque toutes les dimensions dans le cas de changement de dispositif interactif. Il semble donc y avoir un facteur d'hygiène (ou de démotivation) certain entre le visiocasque et les dimensions UX. Le changement d'IHM produit de la motivation lors du passage de l'ancien vers le récent, mais pas de démotivation forte sauf dans le cas des qualités pragmatiques. La motivation est d'ailleurs élevée dans la dimension QP quand on passe d'une IHM sans critère du capacitant à une IHM avec critères du capacitant (+480% de qualités pragmatiques perçues).

Le critère du capacitant de « *sensibilité à* » semble plus fortement corrélé aux attributs tangibles du visiocasque qu'aux spécificités fonctionnelles offertes par l'IHM. En effet celles-ci sont plus difficilement discernables pour un individu en formation. Tester ces dimensions sur des opérateurs expérimentés est intéressant : quid de leur perception, à l'aune de l'expérience qu'il aurait alors du poste de travail, de l'IHM par rapport au dispositif ? Pour répondre à cette question, il faudrait prospecter le champ écologique de la pratique d'usagers expérimentés au sein d'une entreprise.

Comp. de l'évolution moyenne de QP (Qualités Pragmatiques)							
Comparaison des Systèmes			Comp.Valeurs.Moyennes			Moy.Évolutions	
Hyp.2	Système 1	/	Système 2	0,51	/	1,10	116
Hyp.2	Système 2	/	Système 3	-0,35	/	1,33	480
Hyp.3	Système 2	/	Système 1	0,33	/	-0,12	-136
Hyp.3	Système 3	/	Système 2	0,39	/	0,20	-49

Comp. de l'évolution moyenne de QH (Qualités Hédoniques)							
Comparaison des Systèmes			Comp.Valeurs.Moyennes			Moy.Évolutions	
Hyp.2	Système 1	/	Système 2	0,80	/	1,08	35
Hyp.2	Système 2	/	Système 3	1,10	/	1,50	36
Hyp.3	Système 2	/	Système 1	0,43	/	-0,24	-156
Hyp.3	Système 3	/	Système 2	0,92	/	0,65	-29

Comp. de l'évolution moyenne de ATT (Attractivité)							
Comparaison des Systèmes			Comp.Valeurs.Moyennes			Moy.Évolutions	
Hyp.2	Système 1	/	Système 2	0,49	/	1,65	237
Hyp.2	Système 2	/	Système 3	0,79	/	1,73	119
Hyp.3	Système 2	/	Système 1	0,53	/	-0,47	-189
Hyp.3	Système 3	/	Système 2	1,00	/	0,84	-16

Figure 135: Comparaison du critère de sensibilité en fonction des ordres de passage et des hypothèses formulées.

Si nous ne considérons pas les ordres de passage mais simplement les systèmes entre eux, nous pouvons voir en figure 136, que le système 3 est supérieur dans toutes les dimensions mesurées. Nous montrons ici les qualités hédoniques inférieures que sont les qualités hédoniques de stimulation (QHS) et d'identification (QHI).

Système 1 : Hololens 1/IHM Ancienne							
	SUS Moyen	USE Moyen	QP MOY	QHI MOY	QHS MOY	QH MOY	ATT MOY
Moyennes	✘ 42,5	✘ 50,6	✘ -0,32	✘ -0,30	✘ 0,85	✘ 0,28	✘ 0,01

Système 2 : Hololens 2/IHM Ancienne							
	SUS Moyen	USE Moyen	QP MOY	QHI MOY	QHS MOY	QH MOY	ATT MOY
Moyennes	● 56,8	● 61,1	● 0,27	● 0,46	● 1,17	● 0,82	● 0,94

Système 3 : Hololens 2/IHM Nouvelle							
	SUS Moyen	USE Moyen	QP MOY	QHI MOY	QHS MOY	QH MOY	ATT MOY
Moyennes	● 68,2	● 69,8	● 0,89	● 0,70	● 1,71	● 1,21	● 1,39

Figure 136: Valeurs moyennes mesurées pour les dimensions de l'UX pour les trois systèmes étudiés lors de notre expérimentation.

Là, l'IHM Bleue (dite nouvelle) apporte surtout une stimulation supplémentaire par rapport à l'IHM Rouge (dite ancienne) : 1,71 versus 1,17. Si nous considérons la définition de cette sous-dimension à l'aune des propos que l'on énonçait plus tôt (« *Stimulation : Le produit stimule la curiosité et permet d'apprendre des choses nouvelles* »), on voit que l'IHM développée à l'aide des critères du capacitant remplit correctement son rôle

d'apprentissage qu'impose la doctrine n°1 du capacitant : « *Apprendre une nouvelle manière de faire plus performante et maintenir cet apprentissage* ». Par ailleurs, la dimension QHS de S2 est presque équivalente à QHS de S1 (1,17 versus 0,85 comparé à l'amplitude globale de 6 points) ce qui laisse entrevoir le fait que la stimulation générée par le système est corrélée au type d'IHM projetée. Cela semble cohérent car ce n'est pas le visiocasque qui « *permet d'apprendre des choses nouvelles* » mais plutôt les informations qui sont fournies par l'interface Homme-Machine.

Les boîtes de Tukey réalisées pour comparer les systèmes entre eux, révèlent que le système 3 est très supérieur au système 1 en tous points. En effet, systématiquement les trois quartiles supérieurs (Q2, Q3 et Q4) de S3 se situent au-dessus des trois quartiles inférieurs (Q1, Q2 et Q3) de S1 (figures 137,139 et 140).

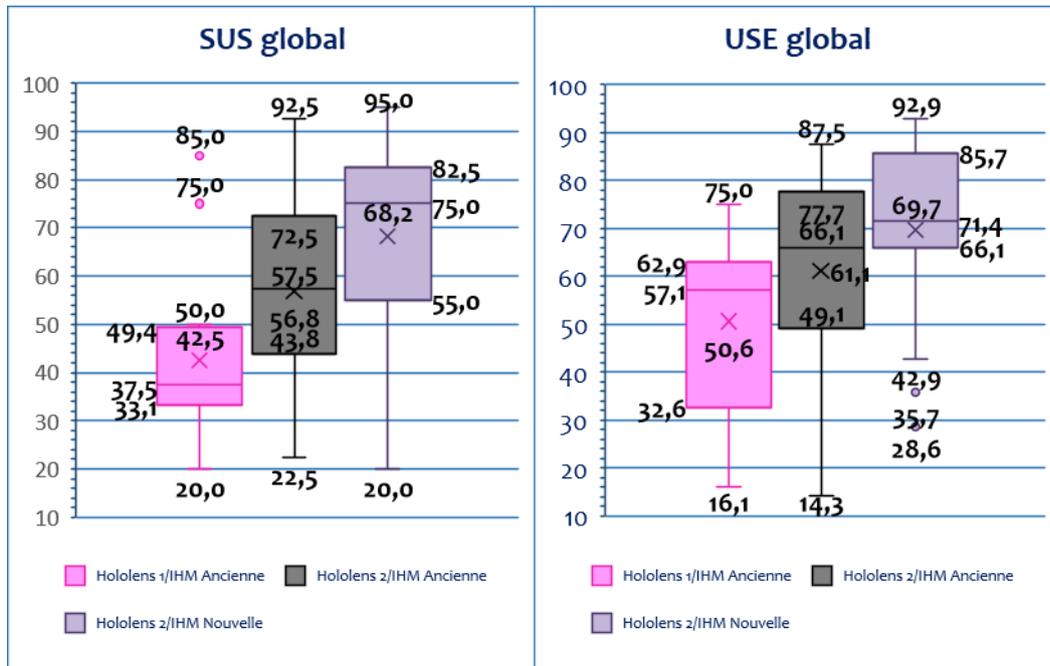


Figure 137: Valeurs globales d'utilisabilité et d'utilité pour les trois systèmes.

Si l'utilisabilité globale des système 2 et 3 souffre d'une forte disparité, ce n'est pas le cas de S1 qui est cantonné à la moitié inférieure de l'échelle. Ce système est donc considéré comme « mauvais » dans l'échelle de Brooke, figure 138, $39 < SUS_{S1} < 52$ (), quand le système S2 est tout juste « acceptable » ($52 < SUS_{S2} < 73$) et S3 presque « bon » ($52 < SUS_{S3} < 73$). Cependant, selon la figure 138, l'acceptabilité du système 3 est considérée comme acceptable par l'échelle SUS tandis que le système obtiendrait une acceptabilité élevée.

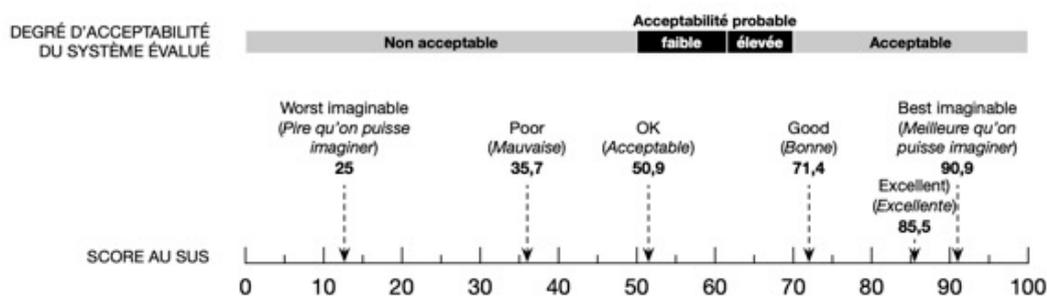


Figure 138: Échelle de Brooke de la dimension d'utilisabilité. D'après Gronier²⁸.

²⁸ <http://www.guillaumegronier.com/cv/blog/files/6545bc93a9d0952c2afac2581129ae7c-0.html>

Les qualités pragmatiques et hédoniques des systèmes sont dans l'ensemble, relativement moyennes (fig.139). Le spectre de perception global de S3 au niveau des qualités hédoniques est tout de même toujours positif $0,50 \leq QH_{S3} \leq 2,36$. Un nombre conséquent d'utilisateurs, considèrent le système 1 comme médiocre au niveau de ses qualités pragmatiques avec presque les trois quartiles inférieurs au-dessous de 0.

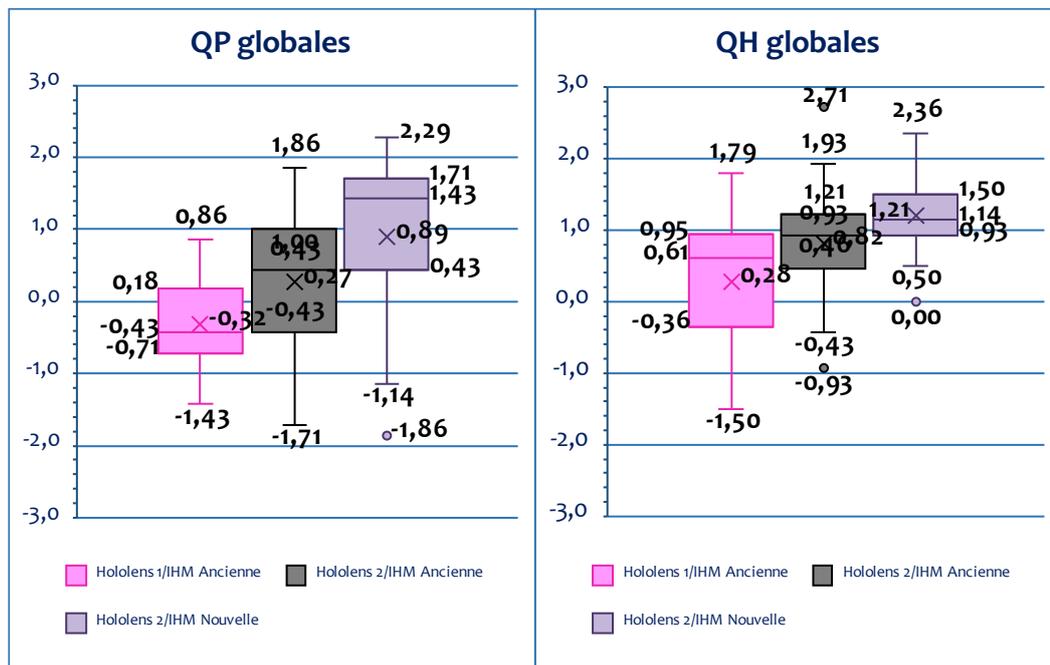


Figure 139: Valeurs globales pragmatiques et hédoniques pour les trois systèmes.

Le système 3 est perçu comme attractif par les utilisateurs (fig.140) qui en revanche, boudent le système 1. S2 a une amplitude d'attractivité assez importante. Les usagers jugent assez différemment l'attractivité de celui-ci. Il est difficile de statuer sur son attractivité réelle à l'aune des études qui ont été réalisées jusqu'à maintenant. Un nombre plus important de participants permettrait peut-être de voir une tendance se dégager.

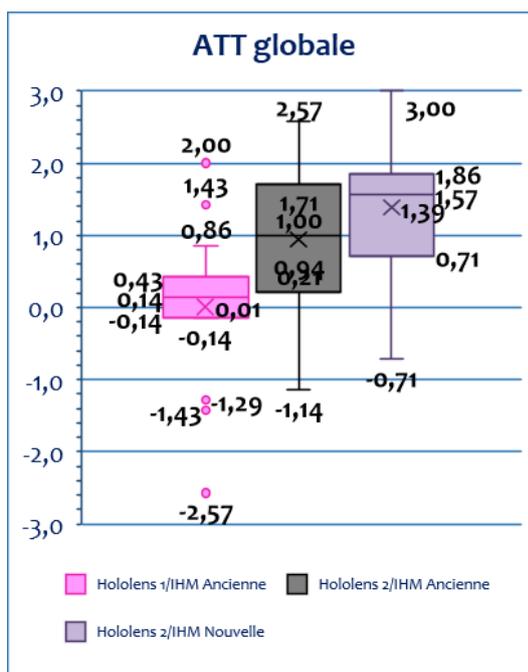


Figure 140: Valeurs globales d'attractivité pour les trois systèmes.

Le questionnaire AttrackDif2 permet de positionner un système au sein d'une matrice dont l'abscisse représente la valeur moyenne des qualités pragmatiques et l'ordonnée, la valeur moyenne des qualités hédoniques, et qui se nomme « portfolio des résultats ». Chaque zone sauf deux possède une description système associée (fig.141). Nous avons placé les systèmes au sein de cette matrice (fig.142).

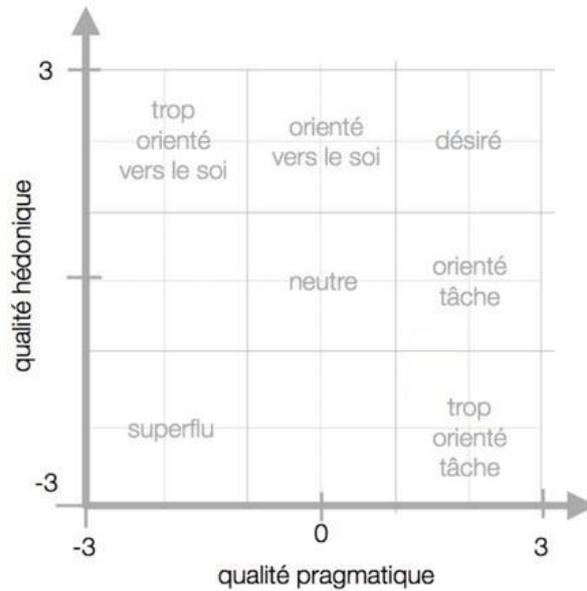


Figure 141: Signification des zones de description de l'orientation du système.

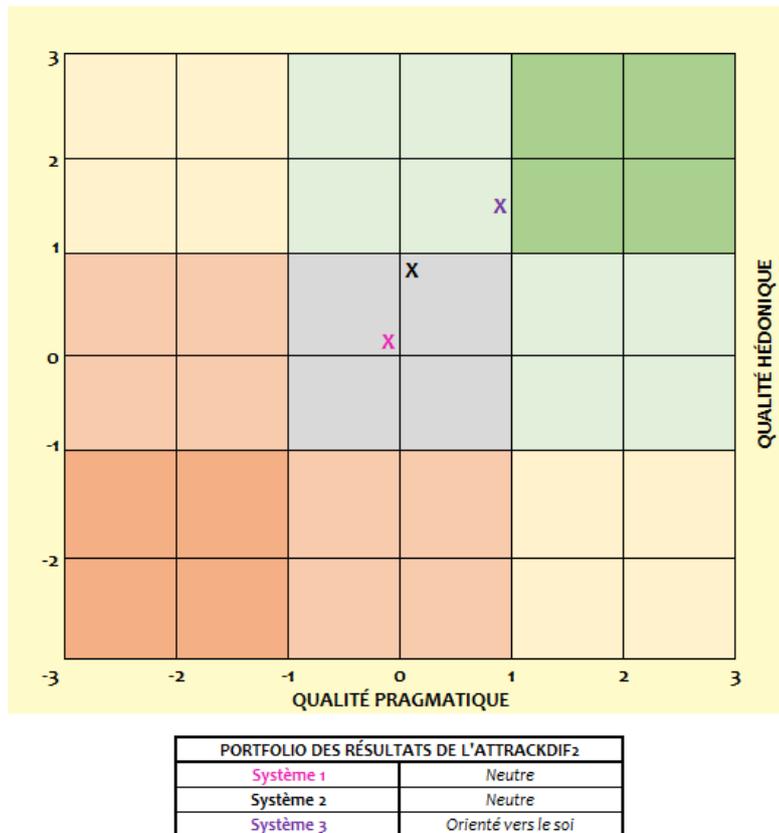


Figure 142: Portfolio des résultats du questionnaire AttrackDif2. Les systèmes sont positionnés au sein de ce portfolio.

Le système 3 se situe dans la zone verte mais ses qualités pragmatiques sont cependant trop faibles pour que le système puisse être jugé comme « *désiré* ». Dans l'état actuel des choses, ce système est perçu comme « *trop orienté vers le soi* ». Pour que celui-ci passe dans la zone « *désirée* », il faut revoir les qualités pragmatiques et donc l'utilisabilité du système. Aujourd'hui, le SUS moyen de S3 est de 68,2, ce qui n'est pas encore suffisant. Le questionnaire AttrackDif2 met bien en perspective le SUS et les limites du système 3 à la lumière de ses dimensions pragmatiques.

Les systèmes 1 et 2, sont neutres dans le portfolio. On voit que le système 2 est proche de la zone verte où les qualités hédoniques sont au niveau minimal souhaité. Cependant, ses qualités pragmatiques nécessitent d'être largement améliorées. Le système 1 nécessite une refonte complète car ses qualités pragmatiques se situent au-dessous de la médiane, et ses qualités hédoniques doivent être aussi largement revues.

Le placement au sein du portfolio montre quelle dimension doit être améliorée pour que le système devienne un système désirable. En revanche, de prime abord, nous ne sommes pas capables de savoir exactement ce qui pose soucis à l'intérieur des dimensions pragmatiques et hédoniques. Pour résoudre cette problématique, nous proposons un algorithme permettant de mettre en exergue les points saillants de reconception des systèmes. Nous n'avons la main que sur l'interface Homme-Machine car les dispositifs interactifs sont des produits marchands que nous ne pouvons pas reconcevoir à l'aune des préconisations extraites par cet algorithme.

Le questionnaire AttrackDif2 est un test de 28 items et l'utilisateur se positionne par rapport à ces différenciateurs sémantiques lorsqu'il répond aux différents items. Entre -3 et -1, l'item négatif est préféré et pondéré à l'aune de la puissance de perception de celui-ci par l'individu. Inversement, de 1 à 3, c'est l'item positif qui est préféré et pondéré par l'utilisateur au travers de sa notation.

En utilisant cette différenciation sémantique d'une part, et la pondération via la complétion du questionnaire AttrackDif2 d'autre part, on crée des nuages de mots. Dans cet algorithme, chaque différenciateur sémantique démarre avec une police équivalente à 1. Chaque notation de l'utilisateur fait augmenter sa police de la valeur relevée dans le questionnaire (de 1 à 3 pour les termes positifs et de -1 à -3 pour les termes négatifs). En fin d'exécution du code, le terme possédant la valeur la plus grande repousse son antagoniste plus faible. Le terme gardé est ensuite injecté dans le nuage de mots. Il en résulte pour chaque système, d'une capacité d'observation des termes qui émergent, positifs ou négatifs, et leur importance pondérée à travers leur perception par l'ensemble des utilisateurs. On rend visible les termes qui émergent et leur importance relative dans la figure 143. Les termes sont classés par groupe : les 7 premiers termes sont associés à la dimension QP, les 14 suivants sont le groupement des 7 termes QHI et des 7 termes QHS, enfin, les 7 derniers sont associés à l'attractivité globale du système (ATT).

La comparaison des nuages de mots laisse transparaître une supériorité claire des systèmes 2 et 3 sur le S1. En effet, ce dernier fait émerger une majorité de termes sémantiques négatifs avec des termes forts comme « *décourageant* », « *ennuyeux* », « *désagréable* » ou encore « *laid* ». De l'autre côté, les systèmes 2 et 3 n'ont comme points négatifs que les aspects sociaux : « *m'exclut* », « *m'isole* » et « *me sépare des autres* ». Cela semble logique car le visiocasque plonge l'individu au sein d'une interface où les avatars sont perçus de lui seul ce qui crée un sentiment d'immersion plus ou moins important, et donc de scission avec le monde uniquement réel que ne peut pas partager l'individu en usage de technique immersive et interactive avec d'autres personnes qui ne seraient pas dans le même monde immersif ou tout simplement non immergées. On ne parle pas des termes « *Technique* » que le questionnaire AttrackDif2 considère comme négatif, par opposition au terme Humain, et que l'on juge comme hautement discutable du point de vue de sa représentation par les créateurs du questionnaire. En effet, un dispositif possédant des caractéristiques techniques ne semble pas spécialement négatif en soi.

Il est intéressant de noter, dans la comparaison entre S1 et S2, que nous gardons la même IHM (Rouge), mais que cependant, le système est défini comme laid, pour S1, alors qu'il

est vu comme beau pour S2. Les entretiens oraux tenus avec les personnes ayant testés les conditions de test S1/S2 et S2/S1 pointent une image très pixélisée et saccadée dans le dispositif Hololens 1, ce qui n'est jamais relevé pour S2 avec l'Hololens 2. Il semble que l'évolution technologique dont a bénéficié l'Hololens 2 pourvoit plus efficacement aux attentes des individus. Idem pour des termes tels que « prévisible/fastidieux », « simple/compliqué », « pratique/pas pratique », ou encore « « décourageant/motivant ». Ces termes sont associés à des difficultés de manipulation des avatars dans l'espace dans S1 que pointent par ailleurs les usagers lors de leur interview (tous !). L'évolution des métaphores d'interaction entre le dispositif interactif Hololens 1 et l'Hololens 2, avec l'incorporation de pression sur les boutons virtuels par toucher déictique, ou encore l'évolution du geste de sélection/désélection (le « AirTap ») semblent concourir à une meilleure perception du système 2 par rapport à S1. Enfin, globalement, les qualités identiquement relevées par les individus à l'usage sont plus importantes dans S2 que dans S1. S2 est ainsi vu plus novateur que S1, plus attrayant, plus attirant, plus maîtrisable, etc.

Système 1:

Technique Compliqué Pas pratique Fastidieux Prévisible Confus Maîtrisable
M'isole Amateur De bon goût Haut de gamme M'exclut Me sépare des
autres Présentable Original Créatif Audacieux Novateur Ennuyeux
Challenging Nouveau Déplaisant Laid Désagréable Attirant Mauvais Attrayant
Décourageant

Système 2:

Technique Simple Pratique Efficace Prévisible Clair Maîtrisable M'isole Professionnel De bon goût Haut de gamme M'exclut Me sépare des autres Présentable Original
Créatif Audacieux Novateur Captivant Challenging Nouveau Plaisant Beau Agréable Attrayant Bon Attrayant Motivant

Système 3:

Technique Simple Pratique Efficace Prévisible Clair Maîtrisable M'isole
Professionnel De bon goût Haut de gamme M'exclut Me sépare des autres
Présentable Original Créatif Audacieux Novateur captivant
Challenging Nouveau Plaisant Beau Agréable Attirant Bon Attrayant Motivant

Figure 143: Nuages des mots pour chaque système. Les différenciateurs sémantiques positifs sont représentés en vert, les négatifs en rouge. La taille des termes évoqués est corrélée au nombre de fois et aux notes données par les participants lors de la complétion du questionnaire AttrackDif2.

La comparaison faite entre S2 et S3 montre une supériorité de S3 sur S2 sur toutes les dimensions sémantiques de comparaison (plus beau, plus pratique, plus agréable, plus motivant, etc.). En revanche, il n'y a pas de différence sémantique inverse, positif/négatif, entre ces deux systèmes. Étant donné le fait qu'il n'y a pas de changement de visiocasque, on peut légitimement associer les différentes évolution positives relevées dans S3 à la projection de l'IHM Bleue. Les individus exposent d'ailleurs la plus-value de l'IHM Bleue lors des interviews : « Informations plus claires. Amélioration des détails des étapes. Communication bidirectionnelle » / « Panneau de configuration bien. Options de

ralenti/accélération des vidéos bienvenue ». Tous relèvent par ailleurs que la calibration de l'IHM Rouge est « à revoir ».

1.2.4 Performances au poste de formation

Les performances au poste de formation peuvent être décrites à l'aune des deux étapes de calibration et de production proprement dites.

Du point de vue de la calibration, le système possédant l'IHM Bleue est plus performant que les deux autres qui ont l'IHM Rouge. En effet, dans l'IHM Bleue, l'observation du QR-Code présent sur le poste de travail permet une calibration automatique du système. Les participants ont donc pris entre quelques secondes et quelques minutes (moyenne : 1 minute) pour effectuer la calibration. Les dispositifs utilisant l'IHM Rouge ont en revanche pris systématiquement un tiers du temps prévu pour l'étape de calibration. Il leur a fallu donc entre 5 et 6 minutes pour calibrer le système manuellement.

Nous avons mesuré les performances de l'étape de production via les 6 sous-tâches qui étaient à réaliser. Du point de vue de la complexité, l'insertion des clips, noir et blanc, sont considérées comme simples à réaliser, il faut détecter l'endroit où placer le clip et l'assembler sur la pièce principale. La coulisse est constituée de deux étapes de complexité intermédiaire consistant à orienter la coulisse dans le bon sens avant de la placer sur la pièce principale en prenant garde à la butée qui sert de référence de placement. Les deux tâches d'insertion et de maintien de la cordelette sont deux sous-tâches complexes qui nécessitent plusieurs points de vigilance, les multiples endroits où la cordelette doit être placée et les quatre ergots de maintien en position de la cordelette sur la glace de custode. La figure 144 résume le ratio des performances (OK/Non-OK) par système et pour chaque sous-tâche. De gauche à droite, nous avons classé les sous-tâches, depuis les plus simples jusqu'aux plus complexes. Les sous-tâches les plus simples, de montage des clips, sont mieux réussies par les systèmes 1 et 2 que par le système 3 (71,4% de performances OK pour S1 versus 41,2% de performances OK pour S3).

Les sous-tâches de complexité moyenne (orientation et butée coulisse) sont principalement plus réussies par les systèmes ayant l'IHM Rouge que le système 3 possédant l'IHM Bleue. S3 s'avère par ailleurs très médiocre dans son ratio de performances des sous-tâches de complexité intermédiaire (17,6% de réussite pour les sous-tâches de montage de la coulisse).

En revanche, les sous-tâches complexes, de montage de la cordelette, qui nécessite de prendre en compte un nombre important de points de vigilance, sont bien mieux réussies dans S3 détenteur de l'IHM Bleue, que dans S2 et surtout S1 qui font fonctionner l'IHM Rouge.

L'analyse vidéo de la réalisation des sous-tâches complexes par les participants met en exergue le fait que les individus interagissent beaucoup plus avec l'IHM pour pouvoir déceler les points de vigilance et les mettre en application lors du montage et du maintien de la cordelette. Par ailleurs, le nombre plus important de retour d'information et la possibilité d'afficher et/ou de cacher telle ou telle information présente dans l'interface semble donner à l'utilisateur une marge de manœuvre supplémentaire qu'il peut utiliser pour définir le cadre le plus cohérent et le plus efficace, pour lui permettre d'effectuer la complétion la sous-tâche. Il en résulte un ratio supérieur de montages corrects par rapport aux montages incorrects, mais aussi un temps de montage plus court.

Les usagers de l'IHM Rouge ont aussi été particulièrement frustrés lors de la complétion des sous-tâches complexes car un nombre important d'entre eux ont purement et simplement abandonné la réalisation de ces deux sous-tâches, participants ainsi à l'augmentation du ratio négatif propre aux systèmes 1 et 2 qui utilisent cette IHM.

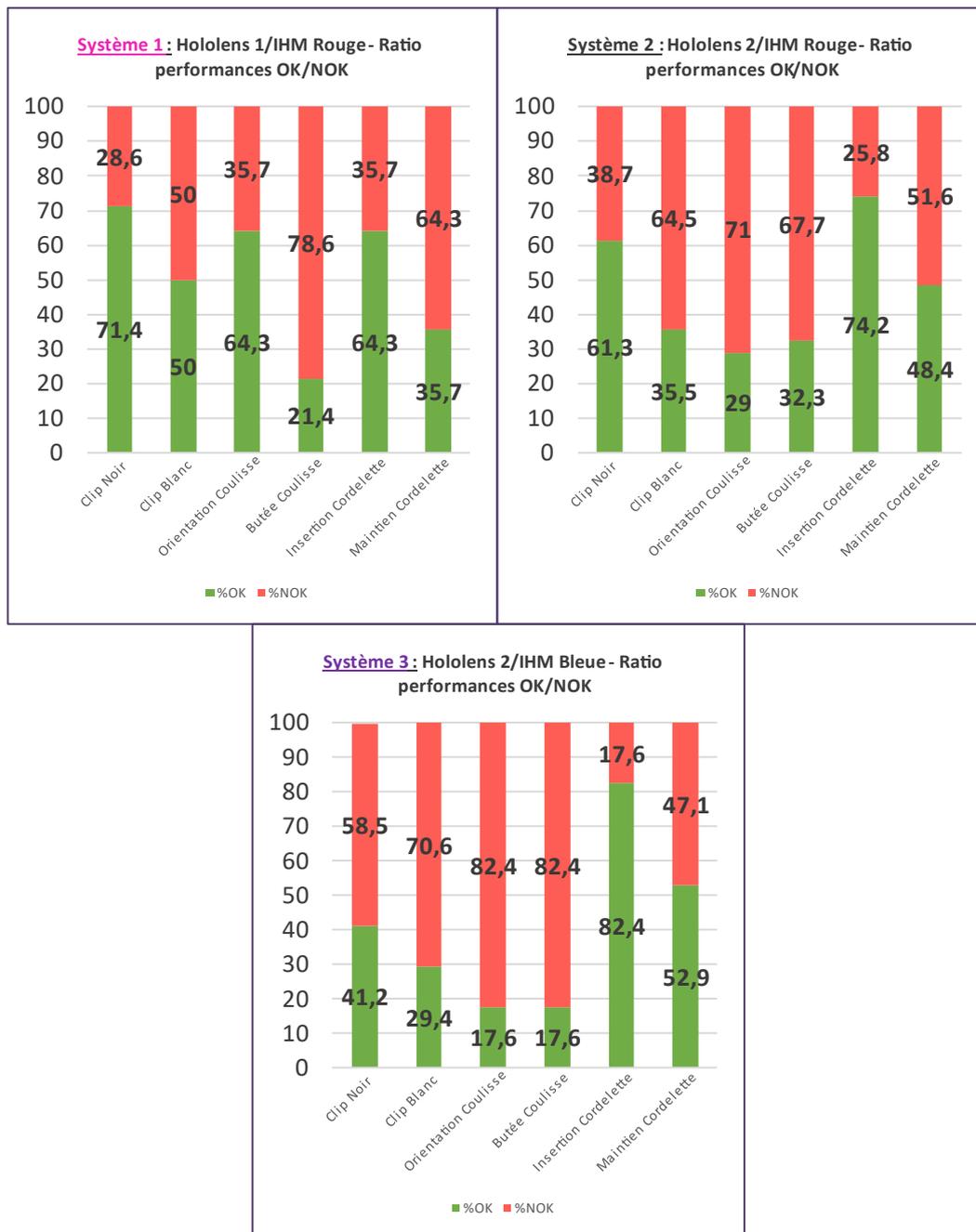


Figure 144: Ratio des performances par système, pour chaque sous-tâche prescrite au sein de la tâche d'assemblage de la glace de custode.

L'IHM Rouge est considérée par les participants comme très directive, qui impose un ordre de montage, et des retours d'information sans que l'on puisse s'y soustraire si toutefois nous considérons cette information comme non-pertinente. Les individus apprécient cependant d'être dirigé dans un premier temps. Ils énoncent tout de même l'idée que s'ils trouvaient une façon de faire mieux différemment de ce qui est préconisé dans l'IHM Rouge, ils pourraient trouver le dirigisme comme un problème.

L'IHM Bleue est perçue comme plus appréciable à l'usage mais les usagers ne voient pas l'intérêt dans le cadre de la formation, de leur laisser une marge de manœuvre trop importante. Si nous mettons ce commentaire récurrent en perspective avec le ratio de performance des sous-tâches de complexité faible et intermédiaire, il semble que ce type d'IHM (IHM Identification) nécessite moins de Marge de Manœuvre Situationnelle (MMS), de transparence opérative et d'instrumentalisation et plus de dirigisme. De l'autre côté,

les tâches complexes nécessitent une forte instrumentalisation pour afficher/cacher les informations pertinentes, et une Marge de Manœuvre Situationnelle plus grande pour tenter d'autre moyens de réaliser la tâche. Ainsi, l'ajustement du couple Homme-Machine au cours du temps, matérialisés par la transparence opérative et l'instrumentalisation semblent être garant de l'obtention d'une performance plus importante sur les tâches complexes. Nous résumons l'intérêt des critères du capacitant, MMS, transparence opérative et instrumentalisation, à l'aune de la complexité des tâches à réaliser dans le cadre de la formation d'un opérateur au sein d'une interface Homme-Machine d'Identification en figure 145.

		Doctrine n°2		Doctrine n°3	
		<i>Marque de Manœuvre Situationnelle</i>		<i>Ajustement du couple Homme-Machine au cours du temps</i>	
		MMS		Transparence Opérative	Instrumentalisation
Complexité de la tâche	Simple	●	●	●	●
	Intermédiaire	●	●	●	●
	Complexe	●	●	●	●
Légende: ● : Inutile ● : Utile ● : Très utile					

Figure 145: Utilité de la mise en place des critères du capacitant eu égard à la complexité des tâches prescrites.

I.2.5 Discussion autour des résultats

Les tests statistiques effectués pour comprendre plus avant les résultats descriptifs que nous exposons dans les paragraphes précédents montrent une significativité à 99% de presque toutes les dimensions UX mesurées entre le système 3 et le système 1. Les considérations à 95% et 90% présentent des résultats variables entre les trois systèmes. Pour cela, on effectue des tests d'analyse de la variance sur les différentes dimensions UX pour vérifier si celles-ci sont significatives et dans quelle mesure. Des tests d'homogénéité de la variance rejettent H_0 , et valident l'homoscédasticité des variances entre dimensions mesurées. On vérifie par ailleurs le coefficient η^2 de pondération de la dimension mesurée dans la statistique calculée (rappel : les valeurs de η^2 sont considérées comme : petites = 0,01 ; moyennes : 0,06, et grandes : 0,12). Ces résultats sont exposés, juste après avec les taux de significativité en figure 146.

I.2.5.1 Corrélations entre âge et systèmes

La MANOVA réalisée pour tenter d'observer les éventuels liens entre système étudié, et âge du participant en regard des dimensions UX considérées. Les résultats ont montré une décorrélation franche entre les deux critères discriminants (âge et système) dans toutes les dimensions (p-valeurs allant de 0,717 à 0,985). Il faudrait revoir ces résultats à l'aune d'échantillons plus importants pour affiner les résultats et voir peut-être une tendance se dégager.

I.2.5.2 Corrélations dans les dimensions utilisabilité et utilité

Les trois systèmes ont été testés pour voir s'il jaillissait une corrélation entre les deux dimensions d'utilité pratique et les systèmes entre eux.

L'utilisabilité tout d'abord. Le test de Levene satisfait aux conditions d'homogénéité des variances avec une p-valeur égale à 0,629. Le coefficient η^2 est grand avec une valeur de 0,179. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,002(**) entre S1 et S3 ce qui est très significatif, et significatives à 10% entre S1 et S2 avec une p-valeur de 0,77(°).

L'utilité ensuite. Le test de Levene rejette l'hypothèse de non-homogénéité des variances avec une p-valeur égale à 0,574. Le coefficient η^2 est moyen avec une valeur de 0,102. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,025(*) entre S1 et S3 ce qui est significatif. Les autres comparaisons échouent cependant à montrer un lien fort entre le questionnaire USE et les systèmes entre eux.

Finalement, on observe une forte corrélation de la supériorité de S3 sur S1 dans les deux dimensions de l'utilité pratique, et seulement une faible corrélation de S2 sur S1 au niveau de l'utilisabilité. Cela permet de conclure sur le fait que l'ajout d'un dispositif interactif plus mature technologiquement allié à une IHM plus conviviale d'utilisation améliore substantiellement l'utilisabilité et l'utilité du système. L'utilisabilité est faiblement corrélée à la technologie de RA seule mais pas liée à l'IHM seule et ce constat n'est pas valable pour l'utilité.

I.2.5.3 Corrélations dans les dimensions QP, QHI, QHS, QH et ATT

Les qualités pragmatiques (QP). (Fig.146). Le test de Levene satisfait aux conditions d'homogénéité des variances avec une p-valeur égale à 0,143. Le coefficient η^2 est grand avec une valeur de 0,156. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,005(**) entre S1 et S3 ce qui est très significatif, et significatives à 10% entre S1 et S2 avec une p-valeur de 0,93(-).

Les qualités hédoniques de d'Identification (QHI). (Fig.146). Le test de Levene ne rejette pas l'hypothèse d'homogénéité des variances avec une p-valeur égale à 0,035. Un test post-hoc de Tamhane mesure malgré tout, les statistiques. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,043(*) entre S1 et S3 ce qui est tout juste significatif. Les autres comparaisons échouent cependant à montrer un lien fort entre la dimension QP et les systèmes entre eux.

Les qualités hédoniques de Stimulation (QHS). (Fig.146). Le coefficient η^2 est moyen avec une valeur de 0,109. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,047(*) entre S1 et S3 ce qui est peu significatif, et significatives à 10% entre S2 et S3 avec une p-valeur de 0,77(-) et aucune corrélation entre S1 et S2. Il est intéressant de noter ici une significativité même faible de S3 avec S2, constat que nous faisons déjà à l'aune des statistiques descriptives que nous expliquions précédemment dans ce même chapitre.

L'attractivité globale des systèmes (ATT). (Fig.146). Le coefficient η^2 est grand avec une valeur de 0,193. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,001(***) entre S1 et S3 ce qui est très significatif. Par ailleurs, S1 comparé à S2 est significatif : 0,021(**).

Nous avons aussi testé les qualités hédoniques globales (QH). (Fig.146). Le test de Levene ne rejette pas l'hypothèse d'homogénéité des variances avec une p-valeur égale à 0,028. Nous effectuons un test post-hoc de Tamhane pour mesurer malgré tout, les statistiques. Les résultats montrent des p-valeurs égales à 0,005(**) entre S1 et S3 ce qui est significatif. Les autres comparaisons échouent cependant à montrer un lien fort entre la dimension QH et les systèmes entre eux.

De la même façon que pour les dimensions d'utilité pratique, l'ajout de la maturité technologique et la convivialité de l'IHM augmentent les dimensions UX de « *sensibilité à* ». L'ajout d'un dispositif interactif n'est donc pas suffisant pour rendre l'expérience utilisateur plus acceptable pour l'utilisateur, il faut revoir l'IHM et y intégrer les critères du capacitant pour que l'individu détecte une différence qu'il reporte dans son évaluation du système considéré. Par ailleurs, nous notons, comme déjà fait précédemment que la sollicitation des stimuli Humain prodiguée par l'IHM capacitante permet un gain de stimulation qui n'est pas négligeable pour les usagers. Ceux-ci le perçoivent d'ailleurs notamment, au travers des nuages de mots où les termes associés à la dimension QHS (Original, Créatif, Audacieux, Novateur, Captivant, Challenging, Nouveau) sont plus importants dans S3 que dans S2.

	Utilisabilité	Utilité	QP	QH		ATT
				QHI	QHS	
S1 / S2	↑		↑			↑ ↑ ↑
S1 / S3	↑ ↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑ ↑ ↑
S2 / S3					↑	

Significativité des résultats: {

- à 0,1%: ↑ ↑ ↑ ↑
- à 1%: ↑ ↑ ↑
- à 5%: ↑ ↑
- à 10%: ↑

Figure 146: Tableau récapitulatif de la significativité des résultats des systèmes entre eux par rapport aux dimensions UX considérées.

II.2.6 Conclusion sur l'étude expérimentale

Nota Bene: Les commentaires issus des entretiens oraux avec les participants sont fournis dans cette section sous forme de phrases en italique.

L'étude expérimentale montre une tendance nette de l'intérêt de la maturité des dispositifs technologiques. En effet, les métaphores d'interaction jouent un rôle important dans la perception que peuvent avoir les usagers de celui-ci. Ces derniers l'expriment d'ailleurs en entretien (« *gestuelle plus naturelle dans l'Hololens 2* », « *métaphores plus simples à utiliser* »). Par ailleurs, un nombre conséquent de participants ont noté une mauvaise image des éléments virtuels dans l'Hololens 1 ainsi qu'un décalage entre le réel et le virtuel (« *ils [les artefacts virtuels] sont saccadés* », « *l'image tremble* »). Aucun participant n'a cependant relevé les mêmes soucis dans l'Hololens 2. La fonction captation doit avoir été améliorée dans le visiocasque récent pour que les hologrammes ne tressautent plus.

La MMS ne fut pas un souci pour beaucoup de sujets (« *Ça ne me pose pas de soucis* », « *plus performant donc plus facile à comprendre* », « *il y avait du choix c'est bien mais je n'en vois pas l'intérêt dans l'exo* »). En effet, nous pensons que l'IHM étant une interface d'apprentissage, le défaut de MMS conséquent dans l'IHM rouge n'est pas nécessaire bien qu'on note des gestes spécifiques à l'application de la MMS dans les cas de réalisation des tâches complexes. Les individus ne doivent pas avoir conscience de l'intérêt de la MMS dans ces cas-ci ou bien ils ne possèdent pas l'expérience de la répétition pour produire des solutions innovantes.

La transparence opérative est appréciée diversement mais tous les participants considèrent l'IHM Bleue plus claire à comprendre que la Rouge notamment dans l'étape de calibration (« *J'ai mis du temps à comprendre si c'était [l'étape de calibration] correct* »). Les vidéos ont aussi posé un souci de compréhension dans leur lecture. Certains sujets n'ont pas vu qu'ils pouvaient passer les étapes via les boutons « *étape précédente* » et « *étape suivante* » sous le lecteur (« *manque le passage d'étape* »). Tandis que du côté de l'IHM Bleue, le panneau de configuration est bien apprécié (« *Panneau de config bien* »). Malgré la présence de la nomenclature que les sujets peuvent afficher, certains se sont plaint du manque de compréhension des désignations des pièces, notamment de la glace de custode.

L'instrumentalisation de l'IHM est sans équivoque évoquée comme bien supérieure. Les participants se sentaient « *comme des robots* » dans l'IHM Rouge. Ils ont considéré le système fermé (« *Système figé pour moi* », « *système emprisonnant* ») et impossible à modifier. L'IHM Bleue est perçue comme « *proche de Windows* » dans son paramétrage pour certains participants.

Au cours de cette étude expérimentale, nous avons prospecté l'intérêt des critères du capacitant dans le développement d'IHM (hypothèse 1). Les résultats semblent montrer que l'utilité pratique, et la « *sensibilité à* » sont fortement impactés par les critères d'instrumentalisation, de transparence opérative, moins par la MMS. Ce dernier critère est cependant observé de façon empirique dans le cas de complétion de tâches à forte complexité. Nous pourrions ainsi établir un dirigisme accru dans le cas de tâches simples et élargir le pouvoir d'agir au fur et à mesure que la complexité croît, et ce, même dans le cas d'IHM de formation (HLI Indentification). Les qualités pragmatiques de notre IHM (Bleue) sont à revoir afin de permettre de meilleures performances (via ce que nous venons d'établir entre autres) mais aussi pour atteindre une IHM vraiment utile et désirable, comme définie dans le portfolio des résultats (fig.142). Les qualités hédoniques sont bonnes mais l'on peut encore les accroître à l'aide des nuages de mots (fig.143) afin de détecter plus finement où les résultats sont les plus faibles.

Nous avons émis les hypothèses suivantes : le passage d'un dispositif aux caractéristiques dépassées est moins performant et confortable d'utilisation qu'un dispositif aux spécificités technologiques plus récentes (*Facteur de motivation*) et le passage du récent à l'ancien, en considérant les dispositifs et les interfaces Homme-Machine, doit permettre de décroître plus franchement encore la satisfaction de l'utilisation par l'individu que lorsque l'on passe de l'ancien au récent (*Facteur de démotivation (ou d'hygiène)*). A ce stade de maturité des outils interactifs, les résultats valident la véracité de ces deux hypothèses avec une forte plus-value dans la maturité technologique des dispositifs de RA dans le facteur de motivation. Nous nous attendions cependant à une plus large démotivation des sujets à l'aune du passage d'un système récent à un système ancien, mais nous pensons, à l'aune des résultats obtenus, que le fait qu'il s'agisse d'un cas de formation à un poste de travail, les individus sont plus focalisés sur la réussite de la tâche prescrite à accomplir que sur les détails inhérents aux manipulations des avatars virtuels dans les systèmes utilisés. Une plus forte corrélation dans le facteur de démotivation est à noter dans le cas du passage d'un dispositif récent à un dispositif ancien. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la perception la plus tangible, en début d'utilisation d'un système que l'on a jamais utilisé, est d'abord effectué par les sens communs (toucher, vue, ouïe, etc.). La perception cognitive étant plus difficile à établir sur une courte durée d'utilisation.

Nous finissons l'état des lieux par les mots de Louart (**Louart, 2002**) sur les facteurs de motivation et d'hygiène éclairants selon nous : « *On voit comment la théorie des deux facteurs finit par séparer deux types de personnes : Ceux qui restent dans la posture Animal-Adam cherchent à échapper aux maux dus au milieu ; ils sont surtout attentifs aux conditions de travail, aux relations avec l'encadrement, à l'administration de l'entreprise et aux aspects sécurisants de la rémunération. Ceux qui s'ouvrent à une posture Humain-Abraham aspirent au développement d'eux-mêmes ; ils sont sensibles aux possibilités qu'on leur offre en matière d'accomplissement, de responsabilité, de promotion et de reconnaissance ; ils évaluent la qualité intrinsèque de leur travail comme moyen de valorisation et d'évolution* ». Ce cas d'étude semble confirmer que les individus se trouvent dans la posture visant à la tentative de création d'un cadre sécurisant pour eux. Cela semble pertinent étant donné la nature de l'IHM (Interface d'apprentissage → Identification). En effet, quand on ne maîtrise pas encore les gestes effectifs et la manière dont réaliser les tâches prescrites au poste de travail, on n'aspire pas au développement de soi-même ni à son évolution proche, on contente les espérances minimales du poste de travail, avant de viser plus grand. C'est la raison pour laquelle les facteurs définis par Herzberg sont si souvent mis en relation avec les facteurs constitutifs de la pyramide de Maslow. Il faut déjà accomplir les usages fondamentaux pour pouvoir s'élever à un niveau cognitif supérieur pour évoluer vers des aspirations plus élevées.

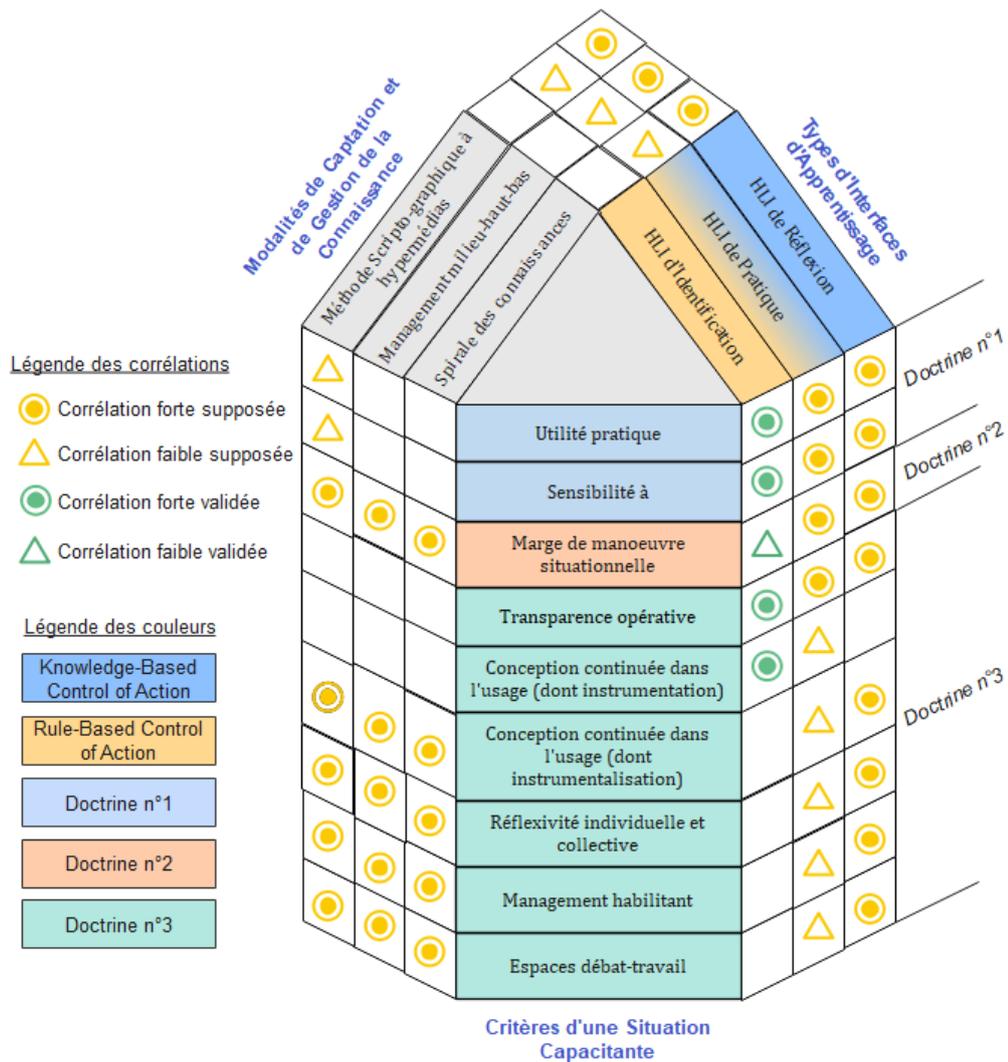


Figure 147: La matrice de corrélation mise à jour à l'aune de l'étude expérimentale menée.

L'étude expérimentale a démontré l'intérêt et l'importance des critères du capacitant dans le développement de situations de collaboration Homme- Machine. Nous avons vu que les doctrines n°1 (« apprendre une nouvelle manière de faire plus performante et maintenir cet apprentissage ») et n°3 (« ajuster les attributs du couple en fonction de la situation »), ont un impact fort sur l'expérience utilisateur tant du point de vue des mesures effectuées à travers les questionnaires, que du point de vue des commentaires fournis par les participants dans les entretiens oraux. La corrélation est forte entre ces critères et la HLI d'Identification (fig.147).

En revanche, nous avons perçu que la Marge de Manœuvre Situationnelle est à double-vue. Certes, elle s'avère utile dans les cas de tâches complexes à effectuer mais inutile dans le cas de complétion de tâches simples. Seule une évaluation écologique de la complétion des tâches peut clarifier le besoin en termes de MMS. L'étude expérimentale permet l'émergence d'une corrélation faible qui sera revue en fonction de la complexité des tâches prescrites au poste de travail (fig.147).

Chapitre II : Méthodologie heuristique de création d'activités

Section 1 Modélisation des procédures de travail

Les technologies de RA possèdent pléthore de caractéristiques techniques qui rendent celles-ci difficilement classifiables. Les technologies sont constituées de plusieurs fonctions technologiques exposées au [chapitre II de la partie UNE](#) : fonction Interface, Captation, Suivi, Calcul, et Restitution. Définir à priori un choix de dispositif interactif se révèle être un exercice ardu, surtout s'il faut considérer l'ensemble des architectures de RA disponibles sur le marché : projecteurs, dispositifs mobiles tels que les smartphones et les tablettes, les visiocasques, etc. De surcroît, les différentes techniques de suivi et de recalage, la multiplicité des métaphores d'interaction existantes, ainsi que les limites technologiques des systèmes peuvent générer une difficulté de la part des industriels, pour pouvoir justifier en amont du développement des interfaces Homme-Machine, la corrélation avec le dispositif choisi.

Le choix du dispositif doit s'opérer à l'aune des besoins que l'industriel explicite lors la conception, et cette explicitation ne doit pas préempter le choix d'un type de dispositif de RA ou, favoriser une architecture en particulier.

Par ailleurs, si les personnels travaillant dans l'industrie ont des compétences larges dans les domaines industriels, les processus de fabrication et les moyens qu'ils peuvent adjoindre à ces processus pour concourir à l'obtention de la performance, il n'est pas assuré qu'ils aient une connaissance des technologies de RA, des limites technologiques qui y peuvent être associées, et des nécessités en termes d'interaction avec la machine.

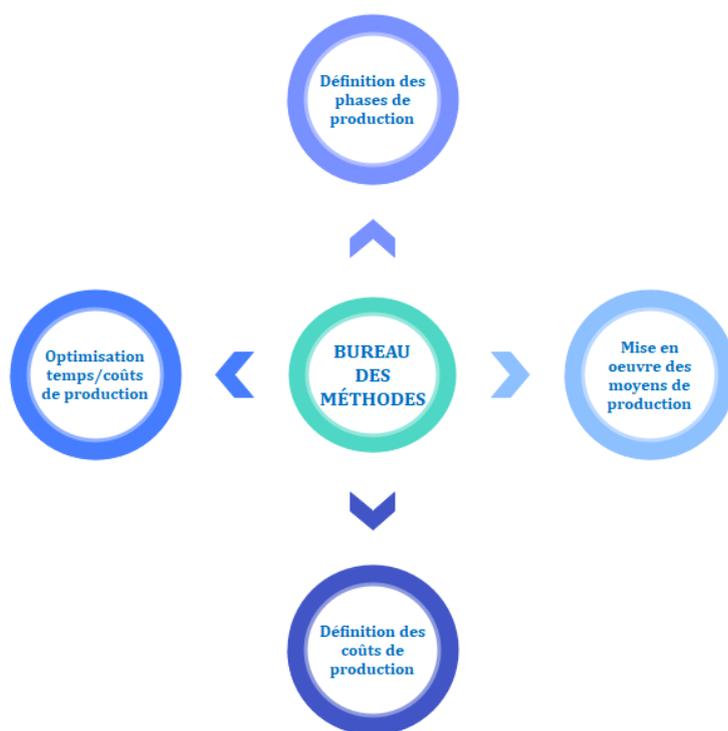


Figure 148: Missions principales remplies par les ingénieurs et techniciens du bureau des méthodes.

Le fonctionnement général de la méthodologie proposée est basé sur la connaissance, a priori, que peuvent avoir, au moment de la conception du poste de travail, les ingénieurs du bureau des méthodes. Ils ont défini le processus de fabrication et les étapes successives qui vont devoir être réalisées pour arriver, en bout de chaîne de fabrication, à la création

d'un bien manufacturé. La gamme de fabrication résultante de cette définition permet de décomposer les étapes du processus en tâches assujetties à des postes de travail distincts dont la difficulté est de faire en sorte que chacun des postes possède un temps de travail effectif similaire aux autres (méthode de chrono-analyse de la ligne de production). Les « méthodistes » ont une connaissance fine de l'appareil de production, des tâches associées aux postes de travail et des tenants et des aboutissants qui en découlent. Ils élaborent et rédigent les modes opératoires des postes en fonction des contraintes qui y sont associées. Nous résumons les grandes missions remplies par les ingénieurs méthodistes à travers la figure 148.

La méthodologie que nous avons pensée considère la connaissance préalable des phases de production et des moyens pour parvenir à la création de valeur ajoutée au sein de la chaîne de fabrication afin de déployer une technologie de RA. En revanche, elle suppose que l'ingénieur en charge de l'élaboration du besoin n'a pas, a priori, de capacités de développement d'interfaces Homme-Machine ni de connaissances très profondes des technologies de RA.

Ainsi, la méthode de choix du dispositif nécessite de partir des données du processus et des modes opératoires rédigés pour créer l'activité de collaboration Homme-Machine et les interactions associées. L'ingénieur en charge de la création de l'activité aura alors pour objectif de renseigner les champs d'information inhérents à la tâche sur laquelle il souhaite adjoindre une technologie de RA à partir de sa documentation usuelle.

Ceci permettra de compléter la première phase de notre méthode choix des dispositifs dont nous nous servons pour finalement choisir les ou les dispositifs en adéquation avec les spécificités de l'activité créée.

Pour permettre de faire émerger cette adéquation, il faut être capable de transformer les spécificités de l'activité créée par l'ingénieur en caractéristiques technologiques. C'est l'objet d'une étape intermédiaire (phase 2) qui aura pour objectif de cartographier l'activité pour en retirer « l'identité » de l'activité. Cette cartographie utilise les travaux de Tönnis et Plecher (**Tönnis and Plecher, 2011**) et s'appuie sur un nombre d'éléments constitutifs de l'interface Homme-Machine qui préemptent les nécessités technologiques qu'il faudra mettre en parallèle pour parvenir à faire corrélérer les spécificités de l'activité et de l'interface et les caractéristiques des technologies de RA.

La récupération de l'identité de l'activité sera l'objet de la troisième phase de la méthodologie. L'ingénieur peut alors discriminer les technologies de RA en fonction d'autres critères tels que le prix, la masse, l'autonomie du système ou sur des critères plus techniques comme le champ de vision (FoV), ou la présence d'un capteur spécifique (un capteur de CO₂ par exemple). A la fin du processus de choix raffiné des dispositifs de RA, l'individu pourra décider de prospecter un panel de technologies ou bien un dispositif interactif distinct. Le choix final est laissé à l'individu ou à sa hiérarchie de choisir entre un ou plusieurs candidats en fonction des critères qu'ils jugeront les plus pertinents pour leur activité.

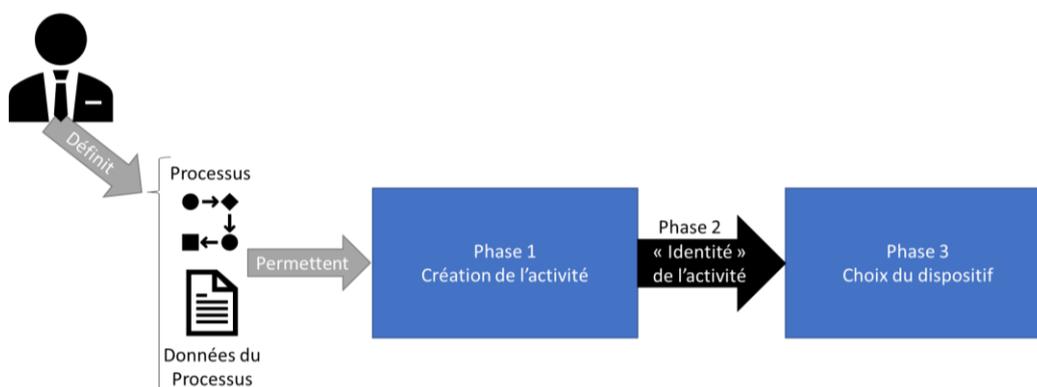


Figure 149: Synoptique général de notre heuristique de création d'activité.

La méthode globale ne repose pas sur un choix ferme et définitif qu'il faut appliquer sans quoi, la situation de collaboration Homme-Machine est impossible, il est nécessaire que la décision finale soit prise à l'aune des spécificités de l'activité créée. Ainsi, le choix du dispositif reposera sur la caractérisation rigoureuse de l'activité créée. La méthode globale est synthétisée en figure 149. Nous rentrons dans le détail de chacune des trois phases de la méthode dans les paragraphes qui suivent.

II.1.1 Phase 1 : Création de l'activité de collaboration Homme-Machine

La phase de création de l'activité de collaboration peut être décomposée en cinq étapes (fig.150). Nous avons bâti un outil de suivi de la méthode au sein d'un tableur doté de contrôles ActiveX et de macros VBA pour créer un ensemble qui permette d'ajouter et/ou de supprimer des ensembles de données facilement.



Figure 150: Les cinq étapes de création de l'activité de collaboration Homme-Machine.

En premier lieu, l'ingénieur méthodes doit faire l'inventaire des éléments constitutifs du poste de travail sur lequel il souhaite adjoindre un dispositif de RA. Ces éléments sont tout ce qui permet de procéder aux tâches prescrites sur le poste : les outils et les machines utilisés, les composants, assemblages, sous-ensembles et pièces du commerce qui sont manipulés, enfin les données qui transitent au sein du poste de travail.

Au sein de l'outil (le tableur), le méthodiste renseigne la *taskBOM* (fig.151). L'intérêt de cette nomenclature est de mettre en exergue les éléments constitutifs de la tâche à réaliser sur le poste de travail sur lequel l'ingénieur souhaite intégrer la technologie de RA. Ainsi, l'ingénieur renseigne tous les éléments qui seront utilisés lors de la tâche prescrite sur le poste de travail. Un code permet de connaître le type d'éléments auquel on a à faire :

- Les machines (EQUIP) : perceuses, visseuses, fraiseuse, etc.. ;
- L'outillage (TOOL) : clé dynamométrique, tournevis, etc.. ;
- Les composants (CPNT) : pièces diverses, etc., qui ne soit pas du commerce ;
- Les assemblages (ASM) : sous-ensemble, ensembles, etc.. ;
- Les pièces du commerce (SHOP) : vis, écrou, etc.. ;
- Les données (DATA) : Documentation diverse numérisée, données de traçabilité, etc...

Code TaskBOM	Désignation de l'élément	Type d'élément	Quantité	Photo(s)	Modèle CAO	Fichier
CPNT	Cordelette	Composant	1	C:\Users\david\Desktop\Dossier Photos\Cordelette	Browse [...]	Browse [...]
CPNT	Clip noir	Composant	1	C:\Users\david\Desktop\Dossier Photos\Clip Noir	Browse [...]	Browse [...]
ASM	Glace de custode	Assemblage	1	C:\Users\david\Desktop\Dossier Photos\Glace de cu	Browse [...]	Browse [...]
TOOL	Cutter sur table	Cutter	1	C:\Users\david\Desktop\Dossier Photos\Cutter	Browse [...]	Browse [...]

Figure 151: La taskBOM de notre expérimentation. Chaque élément utile à la tâche est spécifié (outil, composant, assemblage, machine) afin que le besoin de l'activité soit mis en perspective au travers des caractéristiques géométriques, et dimensionnelles de ces éléments. Ces caractéristiques sont disponibles via les fichiers joints (photos, modèles CAO ou tout autre fichier de cet ordre).

Les éléments utilisés pour la tâche se voient assigner d'une désignation, de son type (ASM, SHOP, DATA, CPNT, etc.) d'une quantité. Par ailleurs, les éléments de distinction géométrique et dimensionnelle tel que les modèles CAO, des photos ou tout autre forme de fichier peuvent être ajoutés en parallèle de la complétion du champ de l'élément entrée dans la *taskBOM*. Les ingénieurs sont en général en possession de ce type d'information résultant à la fois du travail du bureau d'étude (la CAO), mais aussi des différentes nomenclatures élaborées (eBOM pour *engineering Bill Of Material* provenant du bureau d'étude, mBOM).

Une fois la *taskBOM* renseignée, le méthodiste décompose le processus de la tâche prescrite en sous-tâches puis en opérations élémentaires. Cette décomposition provient des travaux de Bowman et Hodges (**Bowman and Hodges, 1999**) de définition des interactions à l'aune de tâches et de sous-tâches définies préalablement. La décomposition préconisée provient de l'ontologie réalisée depuis la tâche prescrite au niveau des processus de l'usine, jusqu'aux traitements élémentaires effectués au sien de l'interface Homme-Machine (fig.152). Ce découpage permet de faire les liens entre les niveaux supérieurs de gestion de la production jusqu'aux éléments d'interaction les plus élémentaires concourant à la réalisation des tâches procédure d'une part, et à l'obtention des performances souhaitées d'autre part.

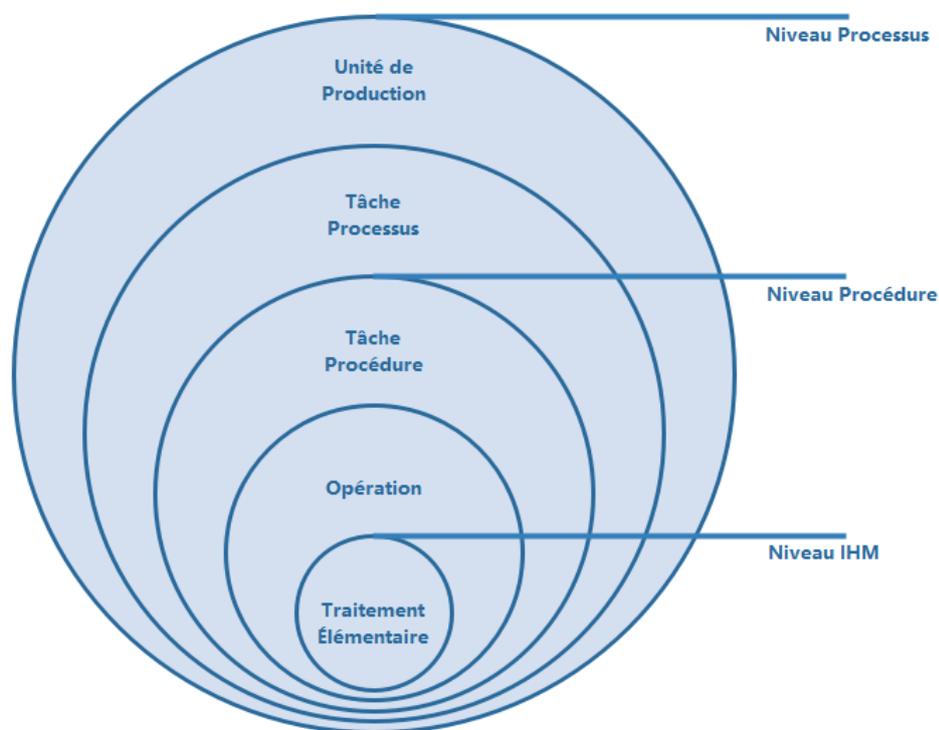


Figure 152: Ontologie de décomposition des processus au niveau de l'usine.

Illustrons ces propos par un exemple tiré de l'étude expérimentale explicitée au **chapitre premier de la partie TROIS**. La glace de custode (la pièce principale) est un sous-ensemble de portière arrière d'un véhicule. Le niveau ontologique supérieur associé à la ligne de fabrication est donc : assemblage porte arrière (gauche) du véhicule. Sous ce niveau processus se situe le poste de travail lié à l'assemblage de la glace de custode. C'est l'objet de notre étude expérimentale.

En descendant d'un niveau, nous entrons dans le domaine de la procédure (d'assemblage dans le cas présent). Parmi les multiples tâches prescrites pour assembler la glace de custode, il y a la tâche « Mettre le clip noir ». Cette tâche ne peut pas être effectuée dans l'état actuel des informations que possède l'opérateur, nous devons descendre encore d'un niveau dans la procédure pour être plus précis (fig.153).

Pour monter le clip noir sur la pièce principale, il faut repérer son emplacement sur le poste de travail. Un opérateur en cours de formation a peut-être, voir certainement du mal à trouver le composant nommé « clip noir » sur le poste de travail. Il faut descendre à un niveau ontologique inférieur et ainsi entrer au niveau de l'IHM.

Celle-ci doit fournir une information pour « détecter objet clip noir », par l'opérateur, sur le poste de travail. Cette décomposition est robuste car, par entrées successives dans les niveaux ontologiques inférieurs, la décomposition des tâches prescrites permet de lier les traitements élémentaires qui devront être effectués au sein de l'interface aux actions demandées au poste de travail sans oublier de traitements élémentaires et donc en permettant une transparence opérative la plus efficace possible.

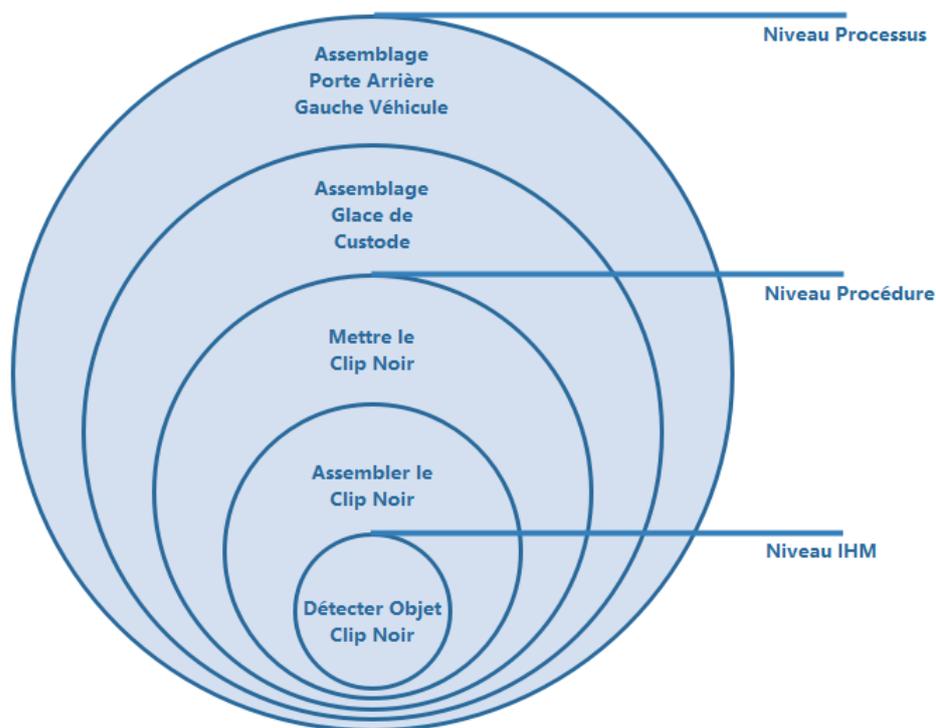


Figure 153: Un exemple de décomposition d'une tâche prescrite au sein d'un processus. Le cas lié à notre étude expérimentale.

Au sein du document de création de l'activité de collaboration, l'ingénieur rempli au travers d'une invite de commande, les différentes étapes contenues au niveau procédure : les tâches procédure (« Mettre le Clip Noir ») et les opérations (« Assembler le Clip Noir »). L'invite de commande suit une procédure standardisée de rédaction des tâches et des opérations.

Le créateur de l'activité de collaboration utilise les listes de sélection à sa disposition pour rédiger la procédure. Ces listes de sélection sont variables suivant le type d'interventions que l'ingénieur souhaite porter à l'attention de l'utilisateur futur. Nous explicitons au [chapitre III, partie UNE, section 2](#), les quatre types d'interventions que peut fournir une IHM à un individu : 1/Questionner l'utilisateur ; 2/Donner une tâche à accomplir ; 3/Fournir une information ; 4/Conditionner l'environnement.

Les listes de sélection seront donc conditionnées par le type d'interventions que produira l'IHM. Les verbes utilisés au sein des listes d'interventions 1 auront une teneur d'analyse et seront des verbes d'action basés sur la recherche (e.g. analyser, calculer, examiner, consulter, etc...), la décision (e.g. déterminer, résoudre, choisir, fixer, ...) ou bien encore la gestion (e.g. enrichir, comptabiliser, optimiser, ...).

Si l'intervention est plutôt axée sur la pratique, les verbes d'action auront une teneur plus pragmatique tels que le contrôle (e.g. mesurer, tester, vérifier, ...), la création (e.g. transformer, adapter, construire, ...), la communication (e.g. rédiger, transmettre, informer, ...) ou bien la production (e.g. appliquer, effectuer, réaliser, faire, ...), ce qui est le cas des interventions de type 2 et 3.

Les interventions de type 4, basées sur le conditionnement de l'environnement ne renvoient pas nécessairement d'action à réaliser mais sont plutôt associées à des retours d'informations telles que la mesure entre deux points, la température de tel objet, la vitesse d'un objet mobile, par exemple.

Finalement, de la complétion de la décomposition des tâches processus en opérations élémentaires, résulte une structure sémantique simple d'actions, de questionnements, et/ou de conditionnement de l'environnement de collaboration Homme-Machine comme suit :

- Verbe d'action + Quoi ? + préposition + Quoi ? + complément.

Avec « Quoi ? », l'objet, l'outil, la machine, ou le matériau utilisé, préposition, une préposition simple (e.g. sur, avec, dans, contre, avant, proche, jusque, etc...), le complément, n'importe quel complément de phrase permettant de donner une information complémentaire à la compréhension du besoin.

Dans notre exemple de tâche « Mettre le Clip Noir », l'opération de montage du clip noir sur la pièce principale est rédigée suivant le formalisme précédent. « Quoi ? » dans le formalisme correspond aux éléments contenus dans la *taskBOM*. Ainsi, les « Quoi ? » correspondent au clip noir et à la glace de custode.

La décomposition des tâches procédure en opérations permettent dorénavant de descendre au niveau IHM pour procéder à la définition des traitements élémentaires qui serviront de fil directeur à l'IHM pour fournir les *interventions* appropriées à l'utilisateur afin qu'il puisse effectuer les opérations nécessaires à la complétion de la tâche procédure.

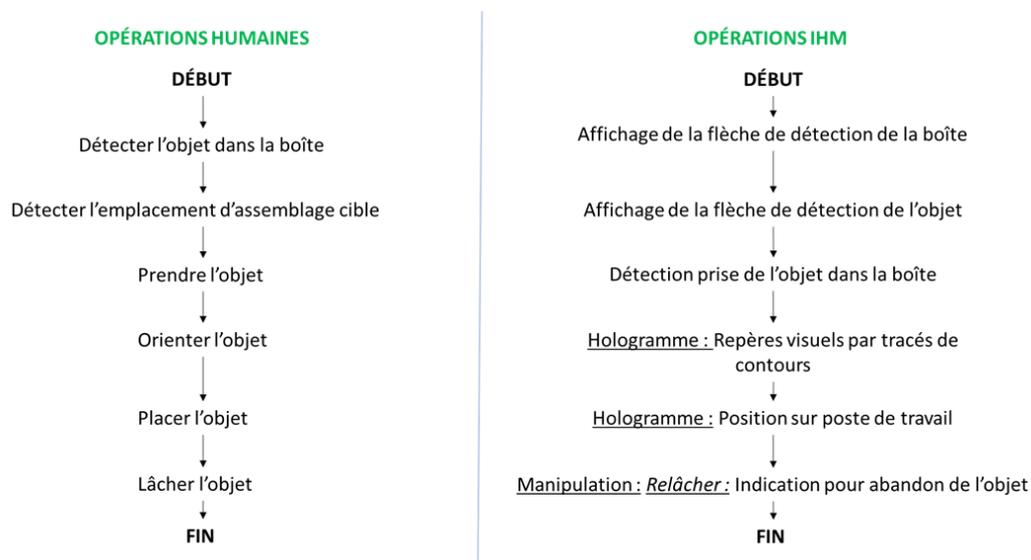


Figure 154: Décomposition de l'opération de montage du clip noir sur la glace de custode via les traitements élémentaires opérés dans l'IHM.

A titre d'exemple, l'opération : « Assembler le Clip Noir » se décompose au sein de l'IHM comme suit (fig.154) :

- Un interacteur donne l'endroit où est localisé l'objet à assembler, ici le clip noir dans la boîte ;

- Un interacteur affiche l'endroit de l'emplacement cible ;
- Un élément virtuel permet la détection de l'objet à assembler via notamment des *colliders* ;
- Un interacteur fourni les informations nécessaires pour placer l'objet ;
- Cette tâche procédure possède une condition de fin de manipulation. Un interacteur audio fourni l'information nécessaire à cette condition.

La décomposition des opérations en traitements élémentaires est visible dans le classeur de création d'activité grâce à des invites de commande dédiées. Un exemple de décomposition de l'opération « Assembler clip noir sur glace de custode » est disponible à la figure 155.

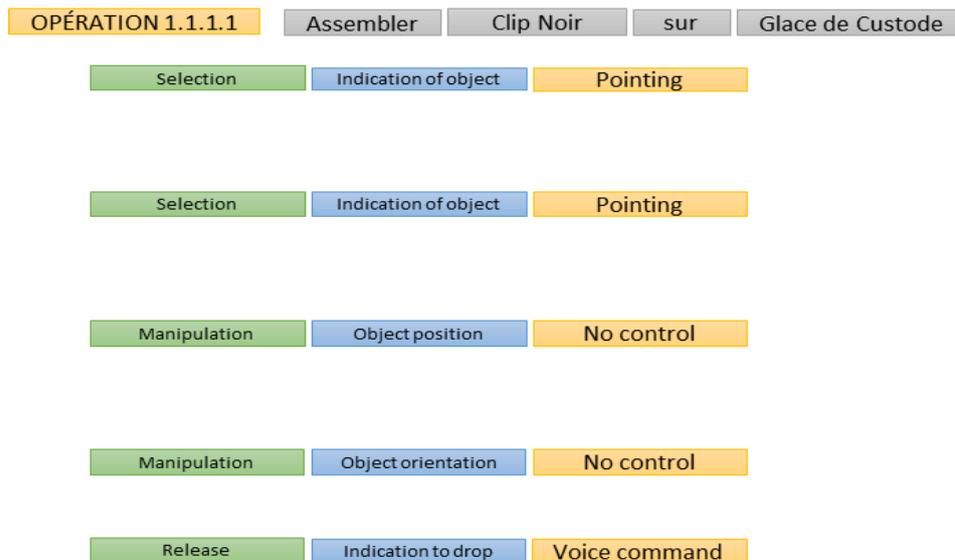


Figure 155: État des lieux du classeur de création d'activité pour l'opération "Assembler Clip Noir sur Glace de Custode".

La décomposition des opérations effectuée, il faut désormais procéder à la définition des interacteurs qui permettront à l'opérateur de voir son environnement de travail augmentée d'informations complémentaires.

Dans le classeur de création de l'activité, l'ingénieur peut procéder au choix des différents interacteurs qu'il souhaite mettre en œuvre pour réaliser les opérations élémentaires utiles pour « Assembler Clip Noir sur Glace de Custode ». Le classeur possède une invite de commande qui permet, à travers la sélection de liste préétablies sur la base des taxonomies élaborées par Papadopoulos et alii ([Papadopoulos et al., 2021](#)) (fig.55 du [chapitre III, partie UNE, section 1](#)).

Sur le traitement élémentaire de détection de l'objet Clip Noir (« Selection – Indication of Object – Pointing »), le dispositif doit d'une part effectuer le suivi du regard pour pouvoir référencer, donc suivre et recalibrer, l'interacteur (fig.156). Le suivi et le recalage de cet interacteur est permis grâce à sa localisation par rapport au QR-Code (« *QR-Code Recognition* »). Le mouvement de la flèche et son affordance visuelle sont permis grâce au mouvement vertical de la flèche qui fournit un indice visuel supplémentaire de stimulation cognitive pour l'utilisateur (« *Movement : yes, vertical* »).

La détection de l'emplacement cible est construite de la même façon que la détection du composant Clip Noir.

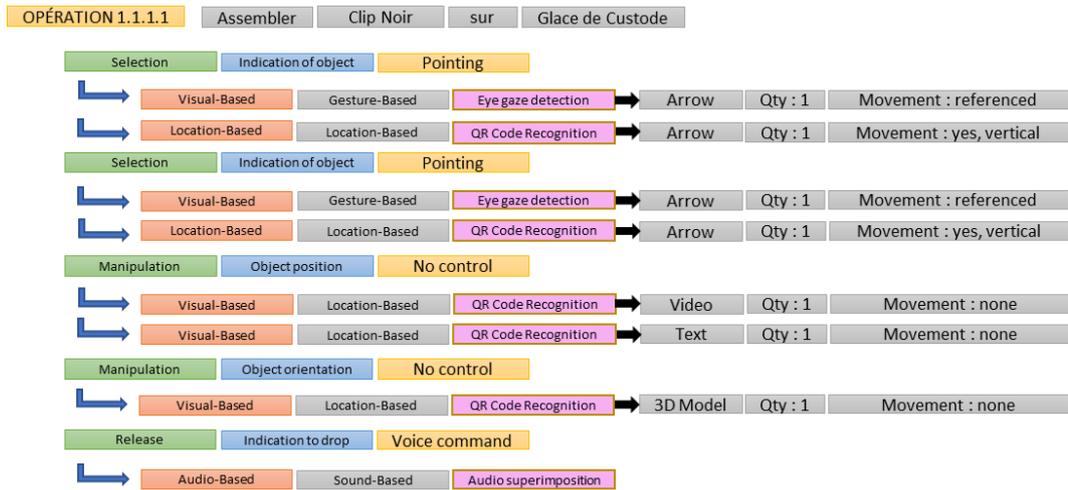


Figure 156: Interacteurs définis sur la base de la taxonomie des interactions Homme-Machine définies par Papadopoulos et alii (Papadopoulos et al., 2021).

Les techniques de manipulation, de position comme d'orientation sont augmentées par l'ajout d'un écran vidéo, d'une information textuelle et d'une animation 3D qui ont pour objectif de créer les conditions optimales de placement et d'orientation du composant sur la pièce principale. Ce type d'interacteur est lié à son positionnement relatif au sein de l'interface (bien que celui-ci puisse changer) et est donc corrélé au système de reconnaissance visuelle basé sur la localisation qu'est la détection de l'emplacement de l'élément virtuel par rapport à l'élément de référence, le QR-Code (« *QR-Code Recognition* »).

Enfin, l'utilisateur peut connaître les éléments de relâchement du composant clip noir sur la pièce principale grâce à un retour d'information audio, associé à un retour vocal (« *audio superimposition* »).

La position relative des éléments entre eux rentre dans l'élaboration de l'activité de collaboration. En effet, sur la base des éléments CAO que possède l'ingénieur des méthodes, il est en mesure de pouvoir déterminer les distances et éventuellement les positions angulaires nécessaires au positionnement fin des éléments virtuels dans l'interface.

Ainsi, sur la base des interacteurs qu'il a défini dans l'étape précédente, il remplit, dans le classeur de création de l'activité de collaboration, les positions et les rotations utiles par rapport au QR-Code dont la position est par ailleurs déjà définie sur le poste de travail.

Objet Virtuel	Position X	Position Y	Position Z	Rotation X	Rotation Y	Rotation Z
Arrow	Value (en m)	Value (en m)	Value (en m)	Value (en °)	Value (en °)	Value (en °)
Arrow	Value (en m)	Value (en m)	Value (en m)	Value (en °)	Value (en °)	Value (en °)

Figure 157: Positions et rotations des interacteurs au sein de l'interface par rapport au QR-Code.

La figure 158 expose le résultat final de complétion de l'étape de montage du clip noir sur la glace de custode au sein de l'interface. Les deux flèches bleues sont visibles ainsi que l'écran vidéo et le bloc d'information textuelle. L'animation 3D est montrée quoique très difficilement lisible dans l'image 158. Le composant issu de l'animation se trouve à l'emplacement prévu à cet effet soit au bout de la flèche bleue pointant vers la pièce principale.

La nature des interacteurs et leur comportement au sein de l'interface ainsi créée font émerger des contraintes auxquelles devront répondre les technologies de RA. Or, les

dispositifs interactifs ne disposent pas tous des mêmes moyens technologiques pour fournir les éléments d'interaction dans une situation de collaboration Homme-Machine. Afin d'avoir une vision claire des dispositifs de RA qui pourraient convenir dans la mise en place d'une nature d'interacteur possédant des comportements spécifiques, il faut conditionner la discrimination de ceux-ci avec une démarche de classification. C'est l'objet du paragraphe suivant qui traite des moyens de classifier les activités de collaboration Homme-Machine en fonction de la nature et du comportement des interacteurs qui y ont été définis.

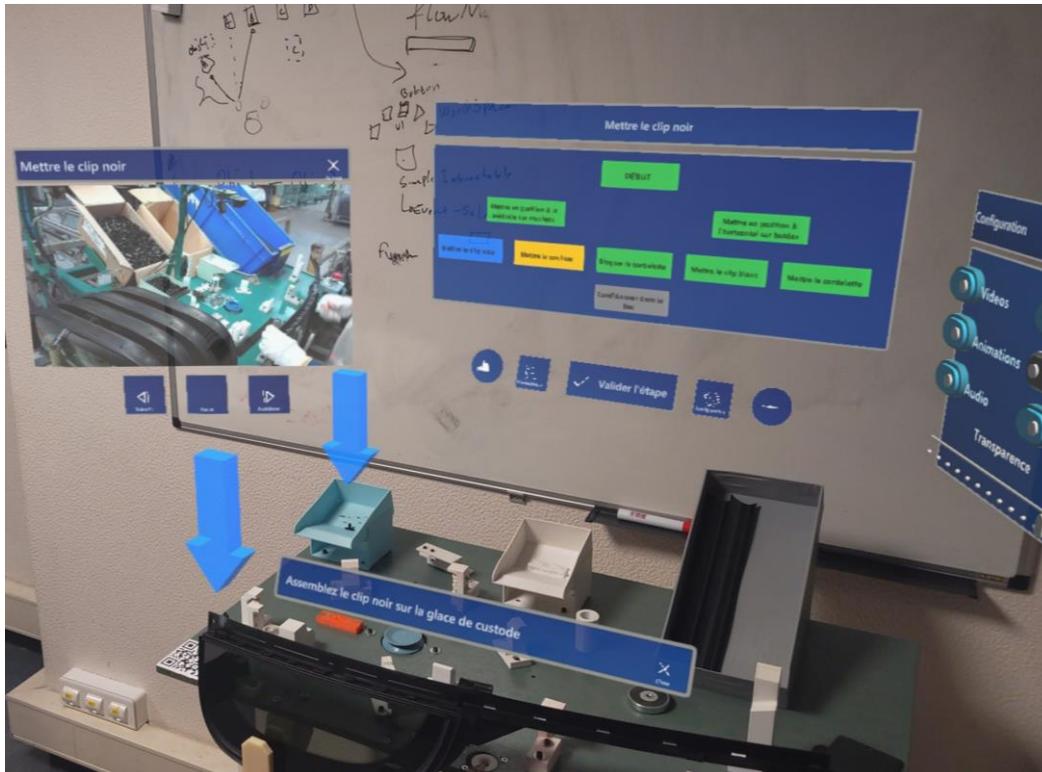


Figure 158: Vue finale de l'étape d'assemblage du clip noir dans l'IHM.

Section 2 Choix des dispositifs de RA/RM

II.2.1 Phase 2 : Définition de l'identité de l'interface Homme-Machine

En premier lieu, il convient de spécifier que cette phase de définition de l'identité de l'IHM conceptualisée n'est pas une étape manuelle qu'effectue l'ingénieur méthodes. Celle-ci résulte du type d'interacteur défini dans l'interface et de son comportement.

L'identité d'une IHM est définie en suivant les travaux de Tönnis et Plecher (**Tönnis and Plecher, 2011**). Les auteurs ont classifié une interface Homme-Machine en fonction de critères expliqués ici. Une interface possède plusieurs classes ontologiques de présentation, elles-mêmes composées d'entités :

- *Classe temporalité :*

La classe temporalité définit le temps d'affichage des interacteurs au sein des interfaces. Deux entités composent cette classe : continue (c), discrète (d). Si un interacteur est continuellement affiché, il nécessitera une technologie permettant cette temporalité. Idem dans le cas inverse.

Le caractère discret ou continue de l'information véhiculée par le (ou les) interacteurs(s) dépendra donc des desideratas des créateurs de l'activité de collaboration Homme-Machine.

Dans le cas du caractère temporel discret, celui-ci est permis par le truchement de l'interface, car c'est au sein de celle-ci que l'utilisateur doit pouvoir mettre fin à la restitution, visuelle, auditive ou haptique, d'un interacteur.

- *Classe dimensionnelle* :

Le classe dimension représente l'espace volumique occupé par les interacteurs. Ceux-ci peuvent être affichés en 2D (2) ou en 3D (3). Les technologies ne permettant pas d'afficher des éléments virtuels en 3D seraient exclues du choix de dispositif au sein d'une interface 3D. Un afficheur interactif de type VST monoculaire tel que des *optical glance* ne permet pas un affichage 3D par exemple. Nous avons discuté de ce type d'architecture de RA dans le [chapitre II, partie UNE, section 2](#), à travers la figure 33(c).

- *Classe recalage* :

La classe recalage est défini par trois entités : « *registered* », « *unregistered* » et « *contact-analog* ». Le recalage d'un avatar virtuel au sein d'un interface doit s'opérer en fonction de ses déplacements et de ses différents mouvements (tête, mains, corps, etc.). L'élément virtuel « *registered* » est indépendant de l'emplacement d'où l'on observe l'élément grâce à la fonction Captation du dispositif qui calcule en temps réel et repositionne l'objet. Ainsi, l'élément est toujours positionné au bon endroit dans l'interface grâce au recalage permanent opéré par le dispositif. La figure 33(a) montre un exemple de mise en œuvre d'une augmentation « *registered* ».

L'entité « *unregistered* » est la réciproque de l'entité précédente. Le système ne recalc pas l'élément virtuel dans l'environnement physique de l'utilisateur. Ceci peut se traduire par exemple par l'affichage dans un coin du champ visuel du dispositif comme le font les système VST monoculaires du type *optical glance*. La figure 33(c) montre un exemple de mise en œuvre d'une augmentation « *unregistered* ».

L'entité « *contact-analog* » est une extension du champ visuel dans la profondeur focale du dispositif. En effet, l'augmentation visuelle est permise grâce à un contact avec l'environnement physique dans la profondeur du champ focal du dispositif. Un exemple de « *contact-analog* » est visible en figure 159 dans un dispositif de RA, ici un système HUD (*Head-Up Display*). Les barres bleues sont projetées sur la profondeur du champ de vision de l'individu pour faire "contact" avec la route. Cela permet à l'individu d'avoir une information visuelle supplémentaire, qui ici lui permet de connaître sa distance vis-à-vis de l'autre véhicule. L'objet de ce type d'entité est de réduire voire de supprimer le temps d'accommodation focale explicitées au [Chapitre II, partie UNE, section 1](#), figure 36 sur les problématiques de vergence et d'accommodation focale dans ce que les experts nomment la *eyebow*. Certaines technologies ne permettent pas ce type d'entité visuelle par le fait que le champ de capture de la scène est très éloigné du système de capture de la scène par l'individu : les technologies mobiles (*smartphones et tablettes*) qui ont pour particularité de générer des effets de parallaxes qui ne peuvent être compensés que par le truchement d'algorithmes dédiés.

- *Classe cadre de référence* :

Le cadre de référence est considéré comme le point de vue avec lequel l'utilisateur perçoit la scène. Il existe trois entités : égocentrique, « *egomotion* » et exocentrique. Nous expliquions déjà en [chapitre III, partie UNE, section 1](#), figure 51, les différentes métaphores d'interaction existantes en les classant suivant qu'elles soient égocentriques ou exocentriques. Une métaphore telle que le Ray-Casting est nécessairement égocentrique car c'est de la paume de la main qu'est projeté le rayon de sélection/désélection des éléments virtuels. Une métaphore du type *World-In-Miniature*

est exocentrique car l'individu n'est plus la référence du monde dans lequel il interagit, il agit sur un monde alors qu'il en est exclu, il le voit de l'extérieur. L'entité « *egomotion* » est un mix entre les deux entités précédentes. Nous pourrions imaginer pour illustrer cette entité, un usager travaillant dans un entrepôt. Celui-ci se déplace au sein de cet entrepôt et une application montre son emplacement sur la carte de l'entrepôt via un avatar ou par une représentation symbolique quelconque. Cette représentation symbolique ou cet avatar est directement lié à l'individu en déplacement mais la vision qu'à l'usager est extérieure au monde perçu dans la carte. Il y a un lien egocentrique avec l'avatar qui suit les déplacements de l'individu mais excentricité car celui-ci est externe au monde visualisé dans le dispositif. Les technologies typiques de ce type d'entité sont les GPS. Il représente l'Humain par un véhicule au sein d'une carte, en 2D ou en 3D et ce véhicule suit les déplacements de l'Humain au sein de cette carte. Pour déterminer les technologies adéquates, il faut interroger leur offre de métaphores d'interaction d'une part, mais aussi le choix d'interacteurs opéré par les créateurs de l'activité de collaboration dans les applications conçues.

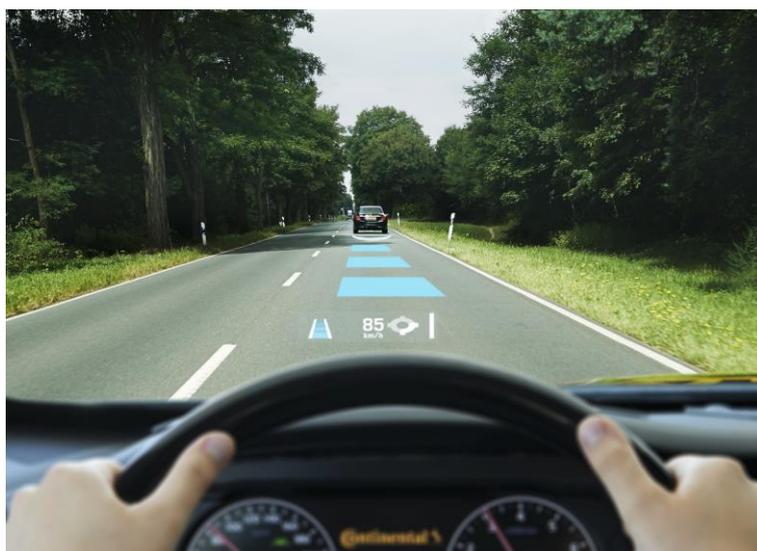


Figure 159: Un exemple de "contact-analog" dans un dispositif de RA, ici un système HUD (Head-Up Display). Source : <https://gpstracklog.com/2014/07/sci-fi-meets-reality-with-new-hud-display.html>

- *Classe visibilité :*

La classe visibilité comprend le référencement de l'objet virtuel considéré en fonction des obstacles visuels pouvant être générés par l'environnement dans lequel celui-ci est affiché. Il existe trois entités distinctes : référencement direct, référencement indirect, ou « *référéncé* ». Le référencement direct permet une visibilité de l'objet directement référéncé dans l'afficheur. Celui-ci ne souffre d'aucun obstacle et suit les mouvements de l'individu à l'usage. Dans notre application (IHM Bleue), le cadre d'information associé à l'opération de calibration est directement référéncé ([chapitre III, partie DEUX, section 2](#), figure 107). Il suit les mouvements de tête ou d'yeux de l'individu pour être toujours présent dans le champ de vision de celui-ci. Les systèmes de RA VST monoculaires ne permettent pas ce référencement direct car ils ne mettent à disposition de l'individu qu'un écran 2D déporté sur un côté. Le référencement indirect est utile si l'objet que l'on souhaite voir visible est caché derrière un autre objet intangible (un mur, une maison, etc.). Il faut alors utiliser des artifices algorithmiques pour permettre à l'usager de voir malgré tout l'objet. Ceci peut se faire en mettant en transparence l'objet occultant ou en créant un trou dans l'objet occultant pour voir derrière. Certains dispositifs VST ([chapitre II, partie UNE, section 1](#), figure 12 (a) et (b)) permettent ces artifices.

Enfin, l'entité « *référéncé* » est une capacité du dispositif de pointer vers un objet qui n'est pas visible directement dans le champ de vision de l'utilisateur. L'indice de référencement peut se faire à l'aide d'artifices de référencement, visuels (une flèche par exemple), auditifs (un son spatialisé) ou haptique (un retour de force orienté dans la direction de l'objet non visible), et permet un recalage de l'artifice de référencement en fonction des mouvements de l'individu dans l'espace physique. Notre IHM Bleue permet ce type de référencement. Cela est observable en [chapitre III, partie DEUX, section 2](#), figure 111, via une grosse flèche bleue pointant vers la glace de custode physique. Un dispositif RA de type SAR est incapable de produire ce type de référencement. Idem concernant le cas d'un dispositif RA basé sur un écran fixe (*static screen*).

- *Classe montage* :

La classe montage définit la position de l'élément virtuel dans le monde réel. Il existe trois entités : montage sur l'Humain, montage sur l'environnement, montage dans le monde. Le montage sur l'Humain présuppose des capacités du système à pouvoir détecter les organes humains : les mains, les yeux, la tête, etc. Avec la prise en compte de ceux-ci, les objets virtuels peuvent ainsi être assujettis à l'individu et suivre le regard, la main, la tête etc. Le montage sur l'environnement correspond, dans notre cas, au poste de travail. Les informations visuelles sont placées dans l'environnement du poste indépendamment de l'individu. Les glaces de custode affichées en figure 111 du [chapitre III, partie DEUX, section 2](#). En revanche, dans la même figure, la flèche bleue est, elle, portée par l'Humain, elle suit ses mouvements/déplacements. Enfin, le montage dans le monde suppose la mise en place d'avatars virtuels qui peuvent être positionnés et exister indépendamment des individus. Les Holograms permettent ce type de montage notamment.

En résumé, on dispose des classes et les dimensions associées aux types d'interfaces que l'on peut obtenir après création d'une activité de collaboration Homme-Machine comme désigné dans la figure 160 :

		Entités		
Classes	<u>Temporalité</u>	<i>Continue</i>	<i>Discrète</i>	-
	<u>Dimensionnelle</u>	<i>2D</i>	<i>3D</i>	-
	<u>Recalage</u>	« <i>Registered</i> »	« <i>Unregistered</i> »	« <i>Contact-Analog</i> »
	<u>Cadre de référence</u>	<i>Égocentrique</i>	« <i>Egomotion</i> »	<i>Exocentrique</i>
	<u>Visibilité</u>	<i>Directe</i>	<i>Indirecte</i>	« <i>Référencée</i> »
	<u>Montage</u>	<i>Humain</i>	<i>Environnement</i>	<i>Monde</i>

Figure 160: Détail des entités par classe considérées utilisées dans la spécification des interfaces Homme-Machine.

Au travers des quelques exemples fournis lors de l'explicitation des classes et des entités, les interfaces peuvent être associées à plusieurs entités au sein de la même classe ou n'en utiliser qu'une seule. L'identité de l'activité de collaboration Homme-Machine résultante en sera d'autant plus discriminatoire que des entités multiples sont utilisées. On peut nommer l'identité de l'interface par un code :

- L'IHM **Bleue** possède l'identité : **cd-3-reg-ego-dir/ref-hum/env**.

Les informations sont affichées en 3D exclusivement (flèches, cadres, écran vidéo, animations CAO) de façon discrète et continue. Tous les interacteurs sont « *registered* », c'est-à-dire que leur position est recalée à tous instants par rapport aux déplacements éventuels de l'utilisateur. Ces informations sont par ailleurs égocentriques car l'utilisateur les perçoit « de l'intérieur ». Certaines informations sont référencées notamment la flèche bleue qui pointe vers un objet réel hors du champ de vision de l'utilisateur (figure 111, [chapitre III, partie DEUX, section 2](#)). Enfin, les informations sont montées dans l'environnement principalement sauf pour le cas de la flèche bleue référencée et le cadre d'information utile à la lecture du QR-Code (figure 107, [chapitre III, partie DEUX,](#)

[section 2](#)), qui placés sur l'Humain, le pointeur de sélection/désélection qui suit les mouvements de l'individu et les métaphores d'interaction par Ray-Casting.

- L'IHM **Rouge** possède l'identité : **cd-2/3-reg-ego-ref-hum/env**.

En effet, les informations sont affichées en 2D (fenêtres informationnelles, numéros des étapes) et en 3D (animations CAO) de façon discrète et continue. Les cadres, photos et vidéos sont « *registered* », c'est-à-dire que leur position est recalée à tous instants par rapport aux déplacements éventuels de l'utilisateur. Ces informations sont par ailleurs egocentriques car l'utilisateur les perçoit « de l'intérieur ». Certaines informations sont référencées notamment la flèche rouge qui pointe vers un objet réel hors du champ de vision de l'utilisateur comme dans le cas de l'IHM Bleue, figure 111 du [chapitre III, partie DEUX, section 2](#). Enfin, les informations sont montées dans l'environnement principalement sauf pour le cas de la flèche rouge référencée, qui est, elle, placée sur l'Humain et le pointeur de sélection/désélection qui suit les mouvements de l'individu.

II.2.2 Corrélations entre identité des interfaces et technologies de RA

L'exposé des classes et des entités fait le parallèle avec quelques technologies de RA. L'objectif est de faire un état des lieux plus complet des corrélations identité interface/technologies de RA, par grands types d'architectures de restitution visuelle des dispositifs interactifs que sont : les appareils Optical See-Through (OST), Video See-Through (VST) binoculaires et VST monoculaires, les technologies mobiles (HHD), les projecteurs (SAR) et enfin, les dispositifs par écran déporté (Static Screen). Cet état des lieux est disponible en figure 161.

		OST	VST-Bino.	VST-Mono.	HHD	SAR	Static Screen
Temporalité	<i>D</i>	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	<i>C</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dimensionnelle	<i>2D</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>3D</i>	✓	✓	✗	✗	✗	✗
Recalage	<i>Reg</i>	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	<i>Unreg</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>CA</i>	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Cadre de référence	<i>Ego</i>	✓	✓	✗	✓	✗	✓
	<i>M</i>	✓	✗	✓	✓	✗	✗
	<i>Exo</i>	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Visibilité	<i>Dir</i>	✓	✓	✗	✓	✗	✗
	<i>Ind</i>	✓	✓	✗	✓	✗	✓
	<i>Réf</i>	✓	✓	✓	✗	✗	✓
Montage	<i>Hum</i>	✓	✓	✗	✗	✓	✗
	<i>Env</i>	✓	✓	✓	✓	✓	✗
	<i>Monde</i>	✓	✗	✓	✓	✗	✗

Figure 161: Matrice de corrélation entre l'identité des interfaces et technologies de RA.

La matrice de corrélation est un outil temporaire qui doit être mis à jour et pondéré en fonction des spécificités techniques intrinsèques de chaque technologie d'une part parce que ces dernières voient leur maturité technologique évoluer au cours du temps, d'autre part, parce que certains des dispositifs possèdent des versions qui peuvent avoir des caractéristiques que ne possède pas d'autre version. Par exemple, le HTC Vive peut être acheté en version Wi-Fi qui pourrait alors générer un montage dans le monde, plus étendu que la version sans Wi-Fi et donc assujetti à l'ordinateur sur laquelle il est branché. Chaque dispositif peut être cependant pondéré à l'aune de l'offre qu'il pourvoit à l'égard de l'identité de l'activité de collaboration qui est créée par les concepteurs de poste de travail. Nous voyons donc que le dispositif et l'offre technologique associée, les

métaphores d'interaction disponibles, la batterie de capteurs incluse, la puissance de calcul peut influencer sur les possibilités que le dispositif a de pouvoir remplir ses missions au sein de l'interface de collaboration Homme-Machine créée. Nous avons donc réalisé une matrice de corrélation supplémentaire sur la base de notre taxinomie des technologies de RA (fonctions Suivi, Captation, Calcul, Interface et Restitution) et des classes et des entités préfigurant l'identité des interfaces (fig.162).

		<i>f</i> (Suivi)	<i>f</i> (Captation)	<i>f</i> (Interface)	<i>f</i> (Calcul)	<i>f</i> (Restitution)
Temporalité	<i>D</i>			✓	✓	✓
	<i>C</i>			✓	✓	✓
Dimensionnelle	<i>2D</i>		✓		✓	✓
	<i>3D</i>		✓		✓	✓
Recalage	<i>Reg</i>	✓	✓		✓	✓
	<i>Unreg</i>				✓	✓
	<i>CA</i>	✓	✓		✓	✓
Cadre de référence	<i>Ego</i>	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>M</i>	✓	✓		✓	✓
	<i>Exo</i>	✓	✓	✓	✓	✓
Visibilité	<i>Dir</i>	✓	✓		✓	✓
	<i>Ind</i>	✓	✓		✓	✓
	<i>Réf</i>	✓	✓		✓	✓
Montage	<i>Hum</i>	✓	✓	✓	✓	✓
	<i>Env</i>	✓	✓		✓	✓
	<i>Monde</i>	✓	✓		✓	✓

Figure 162: Matrice de corrélation entre l'identité des interfaces et notre taxinomie des technologies de RA.

Nous avons vu que le caractère discret ou continu est lié à l'interface. Celle-ci peut contraindre un interacteur à être continuellement affiché ou non. L'affichage en 2D ou 3D est fortement lié aux capteurs embarqués dans le dispositif ainsi qu'à son moyen de restitution. Par exemple, une *optical glance* ne permet pas un affichage 3D car ce dispositif est monoculaire. Le recalage des éléments est associé aux fonctions de captation et de suivi dans les cas « *registered* » et « *contact-analog* » parce qu'il faut que le dispositif ait conscience de l'environnement pour pouvoir repositionner les éléments virtuels au gré des différents déplacements de l'individu. Dans le cas « *unregistered* », la position de référence peut être fixe et ne pas évoluer même en cas de déplacement de l'utilisateur. Ici, le suivi et la captation de l'individu par rapport à un référentiel n'est plus utile. Pour le cadre de référence, nous donnons l'exemple du Ray-Casting précédemment. Les métaphores associées à un cadre de référence egocentrique nécessitent un système de suivi et de captation des différentes localisations d'une part, et une compréhension de la métaphore utilisée par l'utilisateur d'autre part. Ainsi, les cadres de référence egocentrique et exocentrique utilisent l'interface et les fonctions de suivi et captation pour déterminer le type de métaphore utilisé par l'individu. Le cadre de référence « *egomotion* » n'utilise pas l'interface, le positionnement est effectué uniquement à l'aide d'un moyen de reconnaissance de la position de l'individu dans un ensemble. Les visibilités, directe, indirecte et « *référéncée* » nécessitent toutes trois les fonctions de Suivi et de Captation. La différence se fait par le truchement de l'algorithme qui permet, au sein de la fonction de restitution, de produire une différence entre ces trois entités. Enfin, les trois entités de montage nécessitent elles aussi les fonctions Suivi et Captation qui permettent de produire le montage à l'endroit souhaité. En revanche, de par la nature des potentielles métaphores d'interaction résultantes du montage sur l'Humain, cette entité est corrélée à la fonction Interface.

Toutes les classes et entités sont corrélées aux deux fonctions, Calcul et Restitution. En effet, selon la fonction Calcul est le cerveau de la machine, il contient les moyens de calcul des différents algorithmes, de suivi, de recalage, de restitution de l'information. La

fonction Restitution est aussi importante car les opérations faites au sein de la machine doivent ensuite être répercutées dans le dispositif de restitution pour permettre à l'utilisateur d'obtenir l'information utile à la complétion de sa tâche.

II.2.3 Phase 3 : Choix du dispositif de RA

Une fois l'identité de l'interface Homme-Machine identifiée, la phase 3 de la méthode correspond au choix du dispositif en regard des critères discriminants définissant l'identité d'une interface de collaboration Homme-Machine et que nous avons vu au paragraphe précédent. Pour pouvoir effectuer ce choix, il faut préalablement positionner chaque technologie de RA en fonction des disponibilités qu'elle offre grâce à ses caractéristiques intrinsèques (autonomie, masse, prix, etc.). Cela est fait au sein d'une base de données qui récapitule, par classe et entité, les spécificités technologiques des dispositifs (fig.163). Cette base doit être alimentée par une personne ayant des connaissances fines des différentes technologies de RA pour pouvoir juger au mieux des possibilités que permet chaque dispositif interactif.

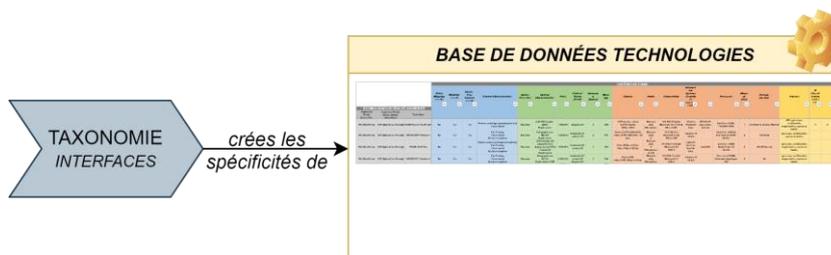


Figure 163: Première étape de l'heuristique de choix du dispositif. La classification des interfaces permet la corrélation entre les spécificités des interfaces et les technologies de RA.

Le système d'information (S.I.) qui permet la création de l'activité de collaboration renvoie le code identité de l'interface créée. Ce code identité est récupéré, puis un filtrage est effectué via une invite de commande, par l'individu en charge du choix du dispositif, sur la base de critères qu'il pourra lui-même définir : le prix, la masse, l'autonomie, le FoV, etc. (fig.164). Par exemple, si l'individu souhaite utiliser un dispositif possédant une autonomie d'au moins 8 heures avec un agent de production évoluant dans un périmètre de travail d'environ 10m², l'usage de clés de tri dans le S.I. lui fournira la liste des technologies répondant à ces deux impératifs. Par l'intégration successive des clés de tri, le filtrage opéré devient toujours plus précis.

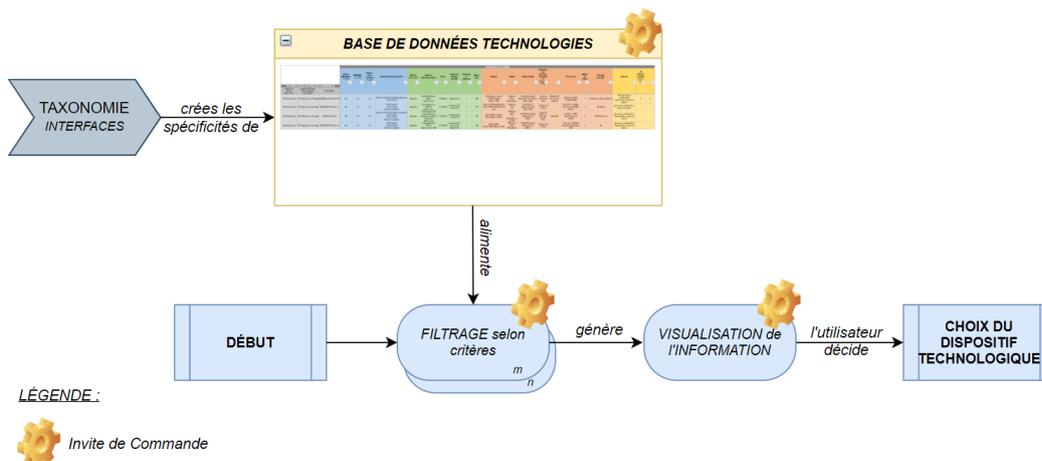


Figure 164: Filtrage des dispositifs et visualisation des informations en fonction d'arguments non liés à la taxonomie des interfaces.

Le système d'information qui s'appuie sur l'heuristique permet la visualisation de l'information au sien de celui-ci. Cette information peut être rendue visible à l'aide de graphiques divers comme au sein de tableau de bord d'aide à la décision. Une invite de commande permet de générer le type de visualisation de l'information souhaitée.

Sur la base d'un premier écrémage effectué grâce au code identité et par l'intermédiaire de clés de tri des technologies sur des critères plus généraux tels que les prix, les masses, etc., l'utilisateur dispose de l'ensemble des paramètres lui permettant de finaliser son choix. Il est entendu que les critères de choix du dispositif effectués dans la phase 3 comme la technique de discrimination des interfaces Homme-Machine réalisée durant la seconde phase ont une part de subjectivité qui ne peut pas être niée. En effet, la limite subjective apportée par le constat que fait « l'expert RA » par rapport aux technologies de RA dans la base de données génère une disparité dans l'affichage des technologies compatibles au sein de l'interface de choix. Conscients de cet écueil possible nous définissons cette méthode comme une heuristique de choix plus qu'un outil d'optimisation du choix. En effet, les étapes successives d'exploration de l'interface d'une part, et du constat fait des dispositifs par « l'expert RA » d'autre part, permettent un choix dans la matrice qui peut s'avérer plus ou moins faible, et fiable, en fonction des hypothèses que nous faisons de l'offre technologique du dispositif considéré.

Chapitre III : Discussion à propos de la méthodologie heuristique

Section 1 Quelques préconisations à l'attention des décideurs

La diversité des architectures technologiques, les différences de maturité atteintes par les dispositifs interactifs (technologies mobiles, visiocasques, projecteurs, etc.), mais aussi l'embarquement des systèmes secondaires (capteurs, puissance de calcul, organe(s) de restitution de l'information) rendent le choix d'un dispositif plutôt qu'un autre, d'une architecture plutôt qu'une autre, très complexe à appréhender. Les choix peuvent alors se faire sur la base de critères fallacieux qui pourraient s'avérer être pas ou peu judicieux en regard des contraintes construites par la collaboration Homme-Machine sur le poste de travail considéré.

La méthodologie ne s'appuie pas sur le dispositif, organe éminemment polymorphe du triptyque Humain-Technologie-Environnement, mais sur la situation de collaboration telle qu'elle est souhaitée par le(s) concepteur(s) du poste de travail (performances, interacteurs, métaphores d'interaction, etc.). L'heuristique prend en compte l'interaction de l'individu avec les artefacts virtuels ainsi que les caractéristiques de l'environnement pour permettre un choix basé sur la corrélation entre les spécificités de sortie de la création d'une situation de collaboration Homme-Machine et les caractéristiques de l'outil RA.

1^{ère} préconisation : Concevoir la situation de collaboration dans un premier temps et interroger les capacités des dispositifs de RA dans un second temps. Ce n'est pas le dispositif qui crée la situation de collaboration, c'est la situation de collaboration qui permet le choix d'un dispositif. On ne fait pas de « technopush » mais du « technopull ».

Ces spécificités de sortie génèrent une méthode de travail que nous appelons *Rule-Based Control of Action*, car le concepteur a développé la situation de collaboration à l'aune de ce qu'il considère être la meilleure façon de procéder pour accomplir les tâches prescrites au poste. Cependant, cette situation de collaboration est évolutive et liée par ailleurs à l'individu en charge de la complétion des tâches. Ainsi, l'ouverture de la situation de collaboration à l'évolution au cours du temps en s'appuyant sur l'expérience des opérateurs, tant du point de vue des tâches au poste, que du point de vue de l'interface de collaboration Homme-machine, est indispensable pour garder un axe de progression de la situation de collaboration. Cette ouverture évolutive, nous la nommons *Knowledge-Based Control of Action*. Cette connaissance s'établit dans le temps et peut évoluer. Il est donc nécessaire de se saisir de toutes les expériences rapportées dans des articles ou dans des démonstrateurs pour enrichir cette connaissance.

2^{ème} préconisation : Permettre l'expression des opérateurs de la ligne de production à travers l'intégration d'outils de formulation des idées, et une organisation habilitante.

L'industriel est sûrement expert du produit qu'il fabrique, pas de la réalité augmentée. L'expert RA, l'entreprise qui développe des IHMs de réalité augmentée, connaît la RA, pas nécessairement le produit manufacturé par le client. L'expression du besoin revêt un caractère fondamental pour que les uns puissent expliquer leur besoin de la manière la plus claire possible, et que les autres puissent entendre le besoin et le traduire en situation de collaboration Homme-Machine efficiente.

La méthodologie heuristique décompose les tâches prescrites toujours plus précisément jusqu'à atteindre le niveau de l'interaction entre l'Homme et la machine. L'accompagnement du concepteur jusqu'au bout du processus de création de la situation de collaboration, depuis la mise en exergue des éléments constitutifs du poste (outils, machines, composants, etc.) et des tâches associées à ces éléments (assembler ceci sur cela, visser ça, etc.) jusqu'au choix de la nature des interacteurs et de leur comportement dans l'interface, permet de définir un Cahier des Charges compréhensible pour l'ensemble des parties prenantes. La discussion est permise autour des éléments de la création de la

situation de collaboration Homme-Machine : tâches et opérations prescrites, interacteurs, métaphores d'interaction. La discussion est faite via des éléments techniques et technologiques qui vont influencer plus tard sur le choix effectif de la technologie. Les critères de prise en compte plus prosaïques que sont le prix ou le R.O.I. (Retour sur Investissement) sont faits à l'aune de ce que la situation de collaboration impose. Or, cette situation de collaboration Homme-Machine est conditionnée par les échanges d'informations qui sont effectués au cours du temps de travail par l'individu et la machine. Il faut que l'individu puisse interagir avec le dispositif pour disposer de l'information adéquate au moment opportun. L'étude expérimentale a montré que le flux bidirectionnel nécessite d'être clair pour être traduit en acte opérationnel performant.

3^{ème} préconisation : Il est nécessaire de développer des interfaces de collaboration claires et compréhensibles (transparence opérative) et facilement modifiables (instrumentalisation) pour permettre d'afficher les informations les plus pertinentes en fonction de la situation.

Le système doit fournir le plus d'aide possible sans ôter pour autant le pouvoir d'agir situationnel de l'opérateur. Cela est d'autant plus vrai dans les situations de complétion de tâches complexes comme le démontre l'étude expérimentale.

4^{ème} préconisation : Il convient d'autoriser une marge de manœuvre situationnelle plus ou moins importante suivant le type de tâches prescrites et le type de public auquel on fait face. Un néophyte conviendra d'un pouvoir d'agir plus faible sur des tâches simples. En revanche, il admettra inconsciemment une marge de manœuvre plus importante lors de la tentative de résolution de tâches plus complexes. Il peut être difficile mais important d'investiguer le poste de travail pour faire émerger les tâches à fortes sollicitations cognitive et conative. L'ouverture d'une MMS dépend de l'état des lieux fait des tâches prescrites de la situation de collaboration Homme-Machine conçue.

Les qualités d'interaction sont importantes, l'interface ne doit pas être qu'axée sur les performances (qualités pragmatiques, utilisabilité), elle doit fournir une expérience utilisateur positive avec des qualités hédoniques développées (stimulation, identification). L'appétence pour la technologie (attractivité) et l'utilité pratique du système dépendent à la fois des qualités hédoniques et pragmatiques que le système pourvoit. L'expérimentation montre par ailleurs que le dispositif interactif est fortement corrélé à la dimension de « *sensibilité à* » du capacitant.

Ainsi, le passage d'une IHM conçue sans les critères du capacitant montre des limites plus importantes notamment dans le domaine de la stimulation (« Stimulation : Le produit stimule la curiosité et permet d'apprendre des choses nouvelles »). L'évolution dans les dimensions mesurées est de l'ordre de 32% à 480% (voir résultats aux figures 134 et 135 de la [partie TROIS, chapitre premier, section 2 : I.2.3 Évaluations globales par système considéré](#)). Par ailleurs, les mesures de satisfaction à l'utilisation des systèmes effectuées durant l'étude expérimentale pointent une augmentation accrue des dimensions associées à cette satisfaction (figures 134 et 135 du chapitre premier de la partie TROIS). Ainsi, on voit les valeurs des différentes mesures UX, d'utilisabilité et d'utilité évoluer positivement de 33% à 116% dans le cas d'un changement pour un visiocasque possédant des métaphores d'interaction plus matures (voir résultats aux figures 134 et 135 de la [partie TROIS, chapitre premier, section 2 : I.2.3 Évaluations globales par système considéré](#)).

5^{ème} préconisation : Les qualités pragmatiques du système utilisé concourent certes à l'utilité et à l'attractivité du système mais il est important de ne pas déconsidérer les qualités hédoniques de celui-ci, et donc de développer aussi l'interface dans cette direction. De ce point de vue, les dimensions UX hédoniques sont fortement corrélées au dispositif interactif. En cas d'évaluation écologique de la situation de collaboration ayant de médiocres qualités hédoniques, il faut prospecter l'intérêt des individus par rapport au dispositif utilisé comme au sein de l'interface. Le choix du dispositif revêt un caractère qui n'est pas anodin et doit donc être effectué précautionneusement (par exemple en testant plusieurs dispositifs différents, parmi ceux émergents en fonction de l'identité de l'IHM créée, sur la même situation de collaboration).

L'étude expérimentale a permis la validation d'un type d'IHM spécialisée dans la formation des futurs opérateurs au poste de travail qu'ils occuperont plus tard, ainsi que la justification pratique de certains des critères d'une situation capacitante. Cependant, que ce soit au sein de cette étude expérimentale, comme dans l'heuristique de création de situation de collaboration et de choix des dispositifs, certaines limites et incertitudes demeurent. Elles font l'objet de la section suivante.

Section 2 Limites relevées et améliorations à apporter

III.2.1 Limites de l'étude expérimentale

L'étude expérimentale menée a permis de dégager quelques résultats possédant une robustesse statistique significative bien que les panels des échantillons des systèmes 1 et 3 soient relativement petits (14 participants par système pour les deux conditions de passage : pour un système donné, suivant s'il est testé en première ou en seconde condition). Pour améliorer les résultats et peut-être fiabiliser les résultats tendancielles qui ont été mis en exergue, il serait nécessaire de faire tester les différents systèmes à une population plus grande encore afin d'accroître les échantillons de chaque système suivant les deux conditions de passage. Le premier élément limitant que nous explicitons est donc la faiblesse relative des échantillons et par conséquent, certains résultats limités à des tendances.

Lors de l'évaluation empirique des situations de collaboration, nous avons observé que certains des paramètres des interacteurs n'étaient pas utilisés dans les interfaces (la modification de la transparence des objets virtuels dans l'IHM bleue, ou les explications conceptuelles dans l'IHM rouge). Il est arrivé que l'information pouvait être affichée sans que l'utilisateur n'aperçoive celle-ci dans l'interface. Il serait pertinent d'utiliser la possibilité de générer des *cartes de fréquentation (heatmaps)* afin de permettre une analyse des points visuels saillants au sein des interfaces. Une étude de ce type permettrait de comprendre le trafic visuel effectué par l'ensemble des usagers lors de la complétion des différentes tâches au poste et ainsi revoir l'architecture des interacteurs, vecteurs d'information, pour les redimensionner. Les qualités pragmatiques s'en trouveraient peut-être améliorées, ce qui pêche largement dans les interfaces aujourd'hui. Second élément limitant l'analyse et pouvant améliorer substantiellement celle-ci, l'absence d'étude des points les plus couramment vus par les utilisateurs dans les interfaces.

Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'effectuer le portage de l'IHM bleue sur des architectures de RA différentes afin d'observer si la même interface Homme-Machine est perçue identiquement sur un support de restitution différent, par exemple un dispositif mobile, ou un visiocasque de VST. Notre étude expérimentale s'est concentrée uniquement sur les technologies de type visiocasques OST de la même marque. Si cela a permis de faire émerger des résultats intéressants, il faudrait dorénavant ouvrir l'expérience à la prospection d'outils divers, des architectures différentes, mais aussi des marques de visiocasques OST concurrentes (Daqri, Magic Leap, etc.). L'expérimentation nous autorise une certaine confiance dans la demande globale mais ne crée pas un savoir définitif.

III.2.2 Incertitudes associées à l'heuristique

L'heuristique élaborée dans un processus itératif en concomitance avec le développement de l'IHM bleue permet de vérifier une partie importante de la phase 1 de création de l'activité. En effet, le cahier des charges est rédigé sur la base de nos éléments théoriques et conceptuels d'alors. Au fur et à mesure des retours de l'ingénieur en charge du développement de l'interface, on affine la méthode et on produit le résultat exposé en [chapitre II de la partie TROIS](#). En revanche, les phases 2 et 3 souffrent d'un manque

de mise en application pour vérification écologique du bien-fondé de l'heuristique. En effet, les conditions dans lesquelles nous avons évolué pour produire l'étude expérimentale et les problématiques organisationnelles n'ont pas permis un choix de dispositif autre que celui « imposé » par les conditions procédurales de notre étude expérimentale. Si la méthodologie heuristique nous semble viable, elle n'a pour l'heure été affirmé par aucun examen de mise en application. La confronter à de nouveaux cas d'usage est une priorité.

Le deuxième point d'incertitude notable porte sur la matrice de corrélation proposée à l'aune des différents concepts explicités tout au long de ce manuscrit de thèse. L'expérimentation conduite a permis de valider la HLI d'Identification vis-à-vis des critères du capacitant associés mais il reste une part significative de corrélation à confirmer par l'analyse. Comme exposé au [chapitre III de la partie DEUX](#), les limites d'expérimentation imposées par le contexte sanitaire d'alors, créent des ouvertures d'évaluation complémentaires, notamment sur les HLI de Pratique et de Réflexion.

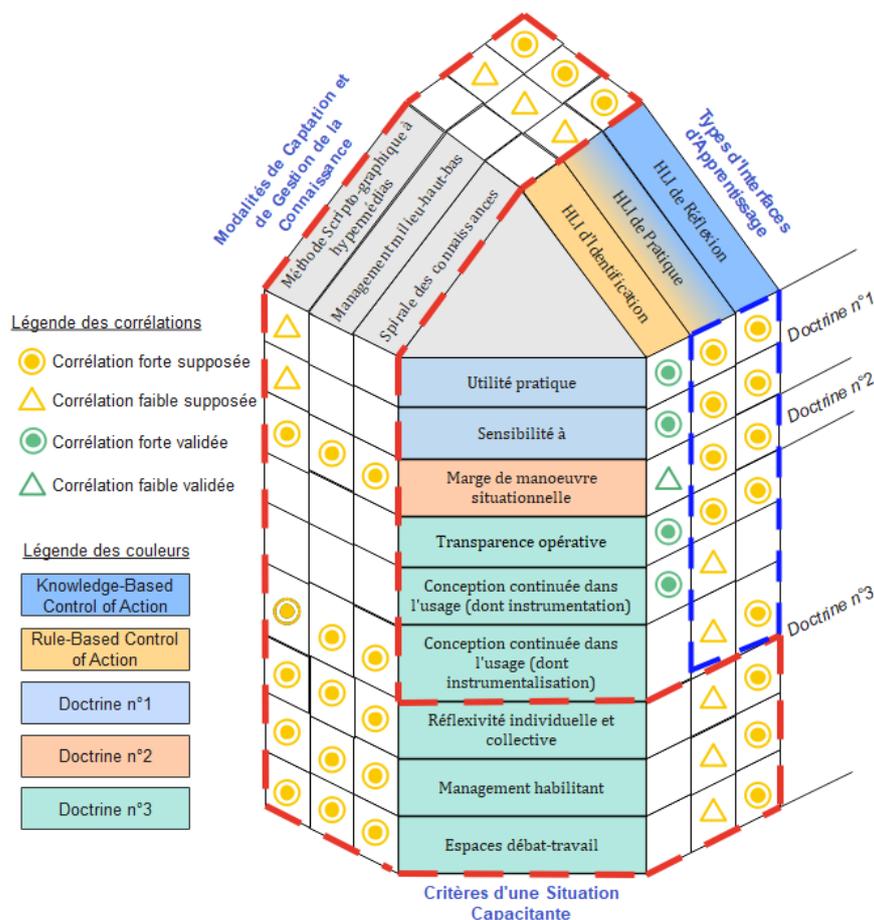


Figure 165: La matrice de corrélation et l'étude expérimentale future qui pourrait être menée à l'avenir.

La validation des corrélations restantes (HLI de Pratique et de Réflexion, fig.165) peut être fait en une étude expérimentale, longue et en situation écologique, c'est-à-dire sur un terrain industriel avec un ou plusieurs opérateurs qui auraient à utiliser une IHM, basée sur les critères du capacitant, sur un temps long (environ une année). Suivant l'organisation industrielle, les corrélations pourraient être validées dans leur ensemble (encadré rouge dans la figure 165) ou partiellement (encadré bleu dans la figure 165).

Nous disons « suivant l'organisation industrielle » car c'est bien celle-ci qui conditionnera la possibilité pour les individus de pouvoir faire évoluer les situations de collaboration avec l'IHM en leur fournissant la responsabilité de pouvoir faire évoluer l'outil interactif ainsi que leurs conditions de travail aux postes de travail sur lesquels les systèmes seraient implantés. Lallemand et Gronier fournissent d'ailleurs des éléments de mesure et d'évaluation des expériences utilisateurs sur de longues périodes dans (**Lallemand and Gronier, 2018**). Nous souhaiterions pouvoir lever tout ou partie des incertitudes restantes sur la matrice corrélation à la faveur d'un partenariat futur avec un industriel curieux.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

La transformation numérique des industries modernes à l'aune des Technologies de l'Information et de la Communication modifie la réalité opérationnelle vécue par les individus sur la chaîne de production. Ceux-ci ne sont plus dédiés à produire sempiternellement les mêmes biens manufacturés, les chaînes de production évoluant au gré des changements de séries opérées par les demandes changeantes des clients. Si les industries doivent s'adapter, les Hommes aussi. Les technologies 4.0 laissent entrevoir des opportunités.

Pour l'heure, les changements de paradigmes opérationnels sont dissonants par rapport aux objectifs élaborés par les décideurs. La faute, dans le cas de la RA, à des dispositifs rigides qui ne permettent pas une expression de l'individu sur la chaîne de fabrication. L'outil est souvent vécu comme une contrainte supplémentaire à gérer plutôt que comme une aide à faire mieux et plus rapidement.

Renverser les méthodes existantes d'implantation des technologies de RA consiste dans un premier temps à ne plus considérer une technologie qui semble intéressante de prime abord et à l'adjoindre à un poste quelconque sans autre forme de considération. C'est à partir de ces constats qu'ont été développés les critères du capacitant et plus spécifiquement le concept de situation de collaboration capacitante (ECS). Introduire des notions tirées du champ de l'ergonomie de l'activité permet de recentrer les activités de conception des postes de travail industriels sous des aspects plus anthropocentrés.

Les travaux exposés au sein de ce manuscrit ont été permis suite au développement des critères du capacitant effectué par le laboratoire partenaire ACTé, spécialiste de l'ergonomie de l'activité. Ces travaux se matérialisent sous la forme de cinq contributions.

La première contribution classe les technologies de RA en prenant en compte toute leur complexité, et les transforme en critères opérationnels pouvant être mis en application sur un terrain d'investigation (*QR1 : Quel substrat scientifique permet de faire corrélés les critères techniques et technologiques des technologies de RA avec les critères d'une ECS inspirés de l'ergonomie de l'activité ?*).

La seconde contribution construit une méthode de création d'une situation de collaboration Homme-Machine qui permet l'obtention de la performance. Cette méthodologie est rendue effective par la construction de notre heuristique de création des activités. Nous avons renversé le paradigme de conception en ne partant plus de la technologie pour construire les interactions mais en partant des caractéristiques de l'environnement, pour définir les interactions et finalement choisir le dispositif de RA couvrant le champ des interactions souhaitées par les concepteurs de la situation de collaboration Homme-Machine. L'heuristique créée répond à la seconde problématique de recherche (*QR2 : Quel moyen méthodologique, peut rendre effectif le choix d'un dispositif de RA en regard de la situation de collaboration Homme-Machine modélisée par les concepteurs dans l'industrie ?*).

Les troisième et quatrième contributions sont liées. L'objet de celles-ci était de créer les moyens de mesure (*QR3 : Quels outils de mesure de la collaboration Homme-Machine permettent d'évaluer une situation de collaboration capacitante (ECS) ?*), et d'évaluer une situation de collaboration Homme-Machine conçue pour l'occasion (*QR4 : Quel protocole d'évaluation de la collaboration Homme-Machine permet de justifier la pertinence des éléments technologiques et ergonomiques dans une situation de collaboration capacitante ?*). Finalement, nous nous sommes appuyés sur une expérience antérieure pour évaluer les changements opérés, sur deux IHMs permettant des situations de collaboration capacitantes de différents niveaux d'une part, et sur deux visiocasques de même marque d'autre part. Le changement de dispositif étant alors corrélé à la volonté d'analyser l'évolution d'une situation d'usage à l'aune des métaphores d'interaction permises par lesdits dispositifs.

Enfin, sur la base de l'heuristique et de l'étude expérimentale, nous avons rédigé quelques préconisations qui nous semblent pertinentes en regard des résultats qui ont été présentés. Ces préconisations concourent à la réalisation de la question de recherche que nous posions initialement : *QR5 : Quelles préconisations peuvent être exprimées sur la base des éléments de l'étude expérimentale réalisée et de l'heuristique élaborée ?*

Les réponses apportées nécessitent pour certaines d'entre elles d'être vérifiées par une étude expérimentale supplémentaire (HLIs de Pratique et de Réflexion et les critères organisationnels du capacitant et du *Knowledge Management*) ou d'être mise à l'épreuve sur le terrain d'un vrai choix de dispositif faisant suite à la création d'une situation de collaboration Homme-Machine (phase 3 de la méthodologie heuristique). Par ailleurs, certains des résultats obtenus nécessitent d'être rendus plus robustes par un ajout toujours plus important de sujets participants à l'étude expérimentale menée précédemment.

Perspectives

Les perspectives qui s'ouvrent à la suite de ces travaux sont variées. Nous avons classé celles-ci dans des perspectives pouvant être prospectées à court, moyen et long terme.

À court terme

Les expérimentations auprès des différents participants ont fait émerger des interrogations sur l'utilité de certains interacteurs au sein des interfaces. En effet, certains ont été peu, voire pas, utilisés. Il se pose alors la question de savoir si ces interacteurs peu ou pas utilisés étaient visibles, et si leur localisation était pertinente. La génération de cartes de fréquentation (ou Heatmaps en anglais) permettrait de voir comment est perçu l'agencement des différents interacteurs dans l'IHM. Il serait ainsi possible de revoir l'emplacement ou même leur géométrie et/ou leur comportement pour ainsi optimiser leur utilisation ou bien encore statuer sur leur inutilité.

Les deux IHMs ont été développées dans le cadre d'une utilisation sous visiocasques HoloLens de 1^{ère} et 2^{ème} génération. Les résultats obtenus concernent donc spécifiquement l'utilisation par un individu d'interacteurs au sein d'une technologies ayant des caractéristiques de manipulations relativement homogènes. Nous pensons qu'il faudrait généraliser le portage de ces IHMS sur divers supports ; Sur des tablettes, sur des écrans déportés, sur des visiocasques monoculaire et binoculaire d'autres fabricants, etc., pour avoir une vision plus exhaustive des possibilités offertes par les spécificités de chaque technologie sur l'expérience utilisateurs. Ces tests pourraient être effectués assez facilement par portage sur des plateformes tierces, moyennant un remaniement de l'utilisation de l'IHM en fonction des caractéristiques de la technologie.

À moyen terme

Si l'on considère les critères du capacitant, un partenariat industriel avec lequel analyser sur un temps long, les IHMs de Pratique et de Réflexion est indispensable. Cela permettrait d'une part de vérifier la pertinence des critères du capacitant, et de justifier la corrélation entre ces critères et les différents concepts exposés précédemment (*Knowledge Management* et types de HLI). D'autre part, si l'on analyse plus attentivement les technologies de RA à l'aune de la classification que nous en faisons, on peut étudier les différentes architectures de restitution visuelle, les plus communes à l'aune d'une IHM développée sur la base des critères du capacitant, l'IHM bleue par exemple. On aurait ainsi une base de comparaison pour examiner les points positifs et négatifs de chaque architecture technologique. Par ailleurs, la prospection des aspects structuraux des dispositifs technologiques aurait pour avantage de commencer à vérifier la pertinence de

notre heuristique, la troisième phase notamment. D'un point de vue méthodologique, il faudrait contribuer au développement de nouvelles interfaces Homme-Machine pour renforcer la phase 1 de l'heuristique.

La figure 165 montre qu'il existe une zone importante de notre matrice de corrélation qui n'a pas encore été vérifiée par l'expérience (cadre rouge). Il faudrait pour vérifier celle-ci, bâtir une expérimentation sur le terrain industriel auprès d'utilisateurs expérimentés sur leur poste de travail. Cette vérification en situation écologique jaugerait de la pertinence de faire corréler les outils de captation et de gestion de la connaissance par rapport aux critères du capacitant inhérents à la troisième doctrine de celui-ci. Ces outils devront être intégrés aux IHMs de Réflexion qui seront par ailleurs testées en parallèle. La nature de ces outils de captation et de gestion des connaissances seront évalués en début d'expérimentation par les scientifiques en partenariat avec l'industriel, pour être par la suite, intégrés aux IHMs.

Des tests de différents dispositifs de RA sur des postes de travail sont régulièrement effectués dans les entreprises. Gageons là que le retour d'expérience qui sera fait permettra de dégager toujours plus d'informations à destination des parties prenantes, garantant de l'évolution de ces dispositifs interactifs et donc de fiabiliser ces technologies dans le cadre d'un usage industriel. Par ailleurs, la littérature fourmille d'expériences diverses sur des applications spécifiques de RA. Certaines explorent d'ailleurs comment la réalité augmentée peut aider des personnels en situation de handicap. Nous pourrions imaginer permettre l'inclusion de ce type de personnel en milieu industriel à l'aide de ces technologies, le dispositif interactif palliant les difficultés de l'individu (physique et/ou psychique). Cette exploration ne rentre pas dans le champ de cette thèse mais le sujet reste néanmoins, à la fois extrêmement intéressant, mais aussi porteur de changement sociétaux de premier plan, selon nous.

À long terme

Pour finir, nous pensons que la conjugaison des technologies du Big Data, avec des technologies de type RA permettront le développement d'Intelligences Artificielles qui incarneront à l'avenir, une aide à la décision primordiale dans un contexte où les données produites et véhiculées occupent une place croissante dans les industries. Pour cela, nous pensons qu'il faut intégrer les concepts que nous avons définis précédemment sur les HLI de Réflexion et le *Knowledge-based Control of Action*, à l'aune des spécificités de développement des IA, pour augmenter le niveau de responsabilisation et d'autonomie des opérateurs d'une part, et obtenir des gains de performances substantiels pour les industries d'autre part.

Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'interroger la pertinence de la géométrie et du comportement des interacteurs au sein des IHMs afin de voir jusqu'à quel point, ces caractéristiques des interacteurs ont un impact sur la prise en main de la technologie de RA et de son environnement logiciel. Cette interrogation devrait être établie en partenariat avec des laboratoires spécialisés dans la conception d'expériences utilisateurs avec des compétences en design UX, et en conception graphique.

BIBLIOGRAPHIE

- Aehnel, M., Urban, B., 2015. The Knowledge Gap: Providing Situation-Aware Information Assistance on the Shop Floor, in: Fui-Hoon Nah, F., Tan, C.-H. (Eds.), *HCI in Business*. Springer International Publishing, Cham, pp. 232–243. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20895-4_22
- Aehnel, M., Wegner, K., 2015. Learn but work!: towards self-directed learning at mobile assembly workplaces, in: *Proceedings of the 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-Driven Business*. Presented at the i-KNOW '15: 15th International Conference on Knowledge Technologies and Data-Driven Business, ACM, Graz Austria, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1145/2809563.2809577>
- Åkerman, M., 2018. Implementing Shop Floor IT for Industry 4.0 62.
- Alben, L., 1996. Defining the Criteria for Effective Interaction Design 5.
- Alliance Industrie du Futur, 2018. 2018 - Alliance pour l'Industrie du Futur - Guide des Technologies.pdf.
- Alves, J.B., Marques, B., Ferreira, C., Dias, P., Santos, B.S., 2022. Comparing augmented reality visualization methods for assembly procedures. *Virtual Real.* 26, 235–248. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00557-8>
- Anastassova, M., Burkhardt, J.-M., Mégard, C., Ehanno, P., 2007. L'ergonomie de la réalité augmentée pour l'apprentissage: une revue. *Trav. Hum.* 70, 97. <https://doi.org/10.3917/th.702.0097>
- Angermann, M., Roberston, P., 2012. FootSLAM: Pedestrian Simultaneous Localization and Mapping Without Exteroceptive Sensors - Hitchhiking on Human Perception and Cognition *Proceedings of the IEEE 100(Special Centennial Issue)*, 1840–1848. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2189785>
- Azuma, R., 1997. A Survey of Augmented Reality 139.
- Bayart, B., Kheddar, A., 2006. Haptic augmented reality taxonomy: haptic enhancing and enhanced haptics 4.
- Beaudouin-Lafon, M., 2000. Instrumental Interaction: An Interaction Model for Designing Post-WIMP User Interfaces 8.
- Bellet, T., 1998. Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain : une application à la conduite automobile (Psychologie). Paris 5, Paris, France.
- Benford, S., Schnädelbach, H., Koleva, B., Anastasi, R., Greenhalgh, C., Rodden, T., Green, J., Ghali, A., Pridmore, T., Gaver, B., Boucher, A., Walker, B., Pennington, S., Schmidt, A., Gellersen, H., Steed, A., 2005. Expected, sensed, and desired: A framework for designing sensing-based interaction. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* TOCHI 12, 3–30. <https://doi.org/10.1145/1057237.1057239>
- Bérard, F., Ip, J., Benovoy, M., El-Shimy, D., Blum, J.R., Cooperstock, J.R., 2009. Did “Minority Report” Get It Wrong? Superiority of the Mouse over 3D Input Devices in a 3D Placement Task, in: Gross, T., Gulliksen, J., Kotzé, P., Oestreicher, L., Palanque, P., Prates, R.O., Winckler, M. (Eds.), *Human-Computer Interaction – INTERACT 2009*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 400–414. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03658-3_45
- Blanco-Novoa, O., Fernandez-Carames, T.M., Fraga-Lamas, P., Vilar-Montesinos, M.A., 2018. A Practical Evaluation of Commercial Industrial Augmented Reality Systems in an Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access* 6, 8201–8218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2802699>
- Bobilier-Chaumon, M.-É., Barville, N., Crouzat, P., 2019. Les Technologies Émergentes au Travail. *Trav. Psychol.*

Bode, M., 2019. Evaluation of an Augmented Reality Assisted Manufacturing System for Assembly Guidance 16.

Bottani, E., Vignali, G., 2019. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IISE Trans.* 51, 284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>

Boudrias, J.S., Bérard, J., 2016. L'empowerment et le leadership d'habilitation. *Psychologie de la bienveillance professionnelle: Concepts, modèles dispositifs* 103–109.

Bowman, D.A., Hodges, L.F., 1999. Formalizing the Design, Evaluation, and Application of Interaction Techniques for Immersive Virtual Environments. *J. Vis. Lang. Comput.* 10, 37–53. <https://doi.org/10.1006/jvlc.1998.0111>

Bowman, D.A., Hodges, L.F., 1997. An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments, in: *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics - SI3D '97*. Presented at the the 1997 symposium, ACM Press, Providence, Rhode Island, United States, p. 35-ff. <https://doi.org/10.1145/253284.253301>

Boy, G., 1988. Operator assistant systems, E. Hollnagel, G. Mancini, D.D. Woods. ed, *Cognitive engineering in complex dynamic worlds*. Academic Press.

Broadbent, D.E., 1971. The Magic Number Seven after Fifteen Years, A. Kennedy & A. Wilkes. ed, *Studies in long-term memory*. New-York, Wiley.

Brooke, J., 1996. SUS - A quick and dirty usability scale 8.

Bruno, L., Robertson, P., 2011. WiSLAM: Improving FootSLAM with WiFi. Presented at the *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2011.6071916>

Büttner, S., Funk, M., Sand, O., Röcker, C., 2016. Using Head-Mounted Displays and In-Situ Projection for Assistive Systems: A Comparison, in: *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. Presented at the PETRA '16: 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments, ACM, Corfu Island Greece, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2910674.2910679>

Card, S.K., Mackinlay, J.D., Scheiderman, B., 1999. *Readings in Information Visualization, Using vision to think* 14.

Card, S.K., Moran, T.P., Newell, A., 1986. *The Psychology of Human-Computer Interaction*, 1st edition. ed. Lawrence Erlbaum Associates.

Card, S.K., Robertson, G.G., Mackinlay, J.D., 1991. The information visualizer, an information workspace, in: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems Reaching through Technology - CHI '91*. Presented at the the SIGCHI conference, ACM Press, New Orleans, Louisiana, United States, pp. 181–186. <https://doi.org/10.1145/108844.108874>

Card, S.K., Robertson, G.G., York, W., 1996. *The WebBook and the Web Forager: An Information Workspace for the World-Wide Web* 11.

Cardin, O., 2019. Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. *Comput. Ind.* 104, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.10.002>

Cheng, J.C.P., Chen, K., Chen, W., 2017. Comparison of Marker-Based AR and Markerless AR : A Case Study on Indoor Decoration System 2, 8.

Clot, Y., Fernandez, G., 2000. Mobilisation psychologique et développement du «métier». *raité de psychologie et des organisations* 323–342.

Compan, N., Coutarel, F., Brissaud, D., Rix-Lièvre, G., 2020. Contribution de l'Ergonomie à la Conception des Nouvelles Technologies dans l'Industrie 4.0 - Vers la Conception de Situations

- Capacitantes, in: *L'activité et Ses Frontières. Penser et Agir Sur Les Transformations de Nos Sociétés*. Presented at the 55ème congrès de la SELF, Paris, France.
- Coutarel, F., Caroly, S., Vézina, N., Daniellou, F., 2015. Marge de manœuvre situationnelle et pouvoir d'agir : des concepts à l'intervention ergonomique: *Trav. Hum.* Vol. 78, 9–29. <https://doi.org/10.3917/th.781.0009>
- Coutaz, J., 1990. *Interfaces homme-ordinateur*, Dunod informatique. Dunod.
- Dey, A., Billingham, M., Lindeman, R.W., Swan, J.E., 2018. A Systematic Review of 10 Years of Augmented Reality Usability Studies: 2005 to 2014. *Front. Robot. AI* 5, 37. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00037>
- Dubois, E., Gray, P., Nigay, L., 2003. ASUR++: Supporting the design of mobile mixed systems. *Interact. Comput.* 15, 497–520. [https://doi.org/10.1016/S0953-5438\(03\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(03)00037-7)
- Dubois, E., Nigay, L., 2000. COMBINONS LE MONDE VIRTUEL ET LE MONDE REEL 4.
- Dubois, E., Nigay, L., Troccaz, J., Chavanon, O., Carrat, L., 1999. Classification Space for Augmented Surgery, an Augmented Reality Case Study 8.
- Egger, J., Masood, T., 2020. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review. *Comput. Ind. Eng.* 140, 106195. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106195>
- Falzon, P., 2005. Ergonomics, knowledge development and the design of enabling environments 8.
- Falzon, P., Teiger, C., 1995. Construire l'Activité, in: *Performances Humaines é Techniques*. Presented at the DESUP/DESS de Paris I, Paris, France, pp. 34–39.
- Fechter, M., Schleich, B., Wartzack, S., 2022. Comparative evaluation of WIMP and immersive natural finger interaction: a user study on CAD assembly modeling. *Virtual Real.* 26, 143–158. <https://doi.org/10.1007/s10055-021-00543-0>
- Ferrati, F., Erkoyuncu, J.A., Court, S., 2019. Developing an Augmented Reality Based Training Demonstrator for Manufacturing Cherry Pickers. *Procedia CIRP* 81, 803–808. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.203>
- Flavián, C., Ibáñez-Sánchez, S., Orús, C., 2019. The impact of virtual, augmented and mixed reality technologies on the customer experience. *J. Bus. Res.* 100, 547–560. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.050>
- Franco, J., Cabral, D., 2019. Augmented object selection through smart glasses, in: *Proceedings of the 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. Presented at the MUM 2019: 18th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, ACM, Pisa Italy, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1145/3365610.3368416>
- Frantz, T., Jansen, B., Duerinck, J., Vandermeulebroucke, J., 2018. Augmenting Microsoft's HoloLens with vuforia tracking for neuronavigation. *Healthc. Technol. Lett.* 5. <https://doi.org/10.1049/htl.2018.5079>
- Funk, M., Bächler, A., Bächler, L., Kosch, T., Heidenreich, T., Schmidt, A., 2017. Working with Augmented Reality?: A Long-Term Analysis of In-Situ Instructions at the Assembly Workplace, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments - PETRA '17*. Presented at the the 10th International Conference, ACM Press, Island of Rhodes, Greece, pp. 222–229. <https://doi.org/10.1145/3056540.3056548>
- Gibson, J.J., 1977. *The Theory of Affordances*, R. E. Shaw & J. Bransford. ed, Perceiving, Acting, and Knowing. Lawrence Erlbaum Associates, Hilldale, NJ.
- Grubert, J., Itoh, Y., Moser, K., Swan, J.E., 2018. A Survey of Calibration Methods for Optical See-Through Head-Mounted Displays. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 24, 2649–2662. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2754257>

- Guest, G., Bunce, A., Johnson, L., 2006. How Many Interviews Are Enough?: An Experiment with Data Saturation and Variability. *Field Methods* 18, 59–82. <https://doi.org/10.1177/1525822X05279903>
- Han, J., Suk, H.-J., 2019. Do users perceive the same image differently? Comparison of OLED and LCD in mobile HMDs and smartphones. *J. Inf. Disp.* 20, 31–38. <https://doi.org/10.1080/15980316.2019.1567612>
- Hartley, R., Zisserman, A., 2004. *Multiple view geometry in computer vision*, 2nd edition. ed. Cambridge University Press.
- Hassenzahl, M., 2003. The thing and I: understanding the relationship between user and product. *Funology* 31–42.
- Hassenzahl, M., Burmester, M., Koller, F., 2003. AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität, in: Szwillus, G., Ziegler, J. (Eds.), *Mensch & Computer 2003*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, pp. 187–196. https://doi.org/10.1007/978-3-322-80058-9_19
- Hassenzahl, M., Tractinsky, N., 2006. User experience—a research agenda. *Behav. Inf. Technol.* 91–97. <https://doi.org/10.1080/01449290500330331>
- Hausmann, M., 2019. *UZMO - Penser avec son stylo: Présenter ses idées, convaincre et faciliter avec la pensée visuelle !*, 1ère édition. ed. Eyrolles.
- Havard, V., 2018. Développement de méthodes et outils basés sur la réalité augmentée et virtuelle pour l'assistance ou l'apprentissage d'opérations dans un contexte industriel. Normandie Université, IRSEEM, LINEACT.
- Havard, V., Baudry, D., 2019. Réalité augmentée dans un contexte industriel. *Ind. Futur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-sf610>
- International Organization for Standardization, 2010. *ISO9241-210 - Ergonomics of Human-System Interaction*.
- International Organization for Standardization, 1999. *ISO 13407:1999 – Human-Centered Design Processes for Interactive Systems*.
- Iwata, H., Yano, H., Uemura, T., Moriya, T., 2004. Food simulator: a haptic interface for biting, in: *IEEE Virtual Reality 2004*. Presented at the IEEE Virtual Reality 2004, IEEE, Chicago, IL, USA, pp. 51–57. <https://doi.org/10.1109/VR.2004.1310055>
- Jacob, R.J.K., Girouard, A., Hirshfield, L.M., Horn, M.S., Shaer, O., Solovey, E.T., Zigelbaum, J., 2008. Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces, in: *Proceeding of the Twenty-Sixth Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '08*. Presented at the Proceeding of the twenty-sixth annual CHI conference, ACM Press, Florence, Italy, p. 201. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357089>
- Jang, H.J., Lee, J.Y., Kim, J., Kwak, J., Park, J.-H., 2020. Progress of display performances: AR, VR, QLED, and OLED. *J. Inf. Disp.* 21, 1–9. <https://doi.org/10.1080/15980316.2020.1720835>
- Jean, A., 2016. La simulation en tant qu'objet de recherche et de développement professionnel: quelles utilisations des savoirs initiés par la recherche dans une formation par alternance intégrative? 165.
- Julien, N., Martin, É., 2018. *L'usine du Futur – Stratégies et Déploiement*. Dunod.
- Jung, J., Park, H., Hwang, D., Son, M., Beck, D., Park, J., Park, W., 2014. A Review on Interaction Techniques in Virtual Environments 9.
- Klimeš, J., 2014. Using Formal Concept Analysis for Control in Cyber-physical Systems. *Procedia Eng.* 69, 1518–1522. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.149>
- Kolski, C., 1995. *Méthodes et modèles de conception et d'évaluation des interfaces homme-machine* 139.

- Koper, R., 2014. Conditions for effective smart learning environments. *Smart Learn. Environ.* 1, 5. <https://doi.org/10.1186/s40561-014-0005-4>
- Kress, B.C., Cummings, W.J., 2017. Towards the Ultimate Mixed Reality Experience: HoloLens Display Architecture Choices. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 48, 127–131. <https://doi.org/10.1002/sdtp.11586>
- La Fabrique de l'Industrie, 2017. 2017 - La Fabrique de l'Industrie - Industrie du Futur - Regards Franco-Allemands.pdf (No. 15), Les synthèses de La Fabrique. La Fabrique de l'Industrie.
- Lallemand, C., Gronier, G., 2018. *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir des expériences optimales*, 2ème édition. ed. Eyrolles.
- Lallemand, C., Koenig, V., Gronier, G., Martin, R., 2015. Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *Eur. Rev. Appl. Psychol.* 65, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2015.08.002>
- Lecolinet, E., 2003. A molecular architecture for creating advanced GUIs, in: *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '03*. Presented at the the 16th annual ACM symposium, ACM Press, Vancouver, Canada, pp. 135–144. <https://doi.org/10.1145/964696.964711>
- Lecolinet, E., Pook, S., 2002. Interfaces zoomables et Control menus 21.
- Lee, Byounggho, Yoo, C., Jeong, J., Lee, Byoungghyo, Bang, K., 2020. Key issues and technologies for AR/VR head-mounted displays, in: Lee, J.-H., Wang, Q.-H., Yoon, T.-H. (Eds.), *Advances in Display Technologies X*. Presented at the *Advances in Display Technologies X*, SPIE, San Francisco, United States, p. 1. <https://doi.org/10.1117/12.2551400>
- Leplat, J., 1997. *Regards sur l'activité en situation de travail. Contribution à la psychologie ergonomique*, PUF. ed. Paris, France.
- Louart, P., 2002. Maslow, Herzberg et les théories du contenu motivationnel 18.
- Loup-Escande, É., Burkhardt, J.-M., 2019. Évaluer l'utilité dans le contexte des technologies émergentes pour identifier des besoins latents : éléments issus d'une analyse des interactions en situation d'usage. *Activites*. <https://doi.org/10.4000/activites.4554>
- Lund, A.M., 2001. Measuring Usability with the USE Questionnaire 12 4.
- Mackay, W.E., 1998. Augmenting Reality: A new paradigm for interacting with computers 9.
- Mallem, M., Roussel, D., 2019. *Réalité augmentée – Principes, technologies et applications*. *Trait. Signal Ses Appl.* <https://doi.org/10.51257/a-v3-te5920>
- Mann, S., 1994. *Mediated Reality*.
- Masood, T., Egger, J., 2020. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Comput. Ind.* 115, 103112. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.07.002>
- Masood, T., Egger, J., 2019. Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 58, 181–195. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.02.003>
- Meirelles, I., 2014. *Design de l'information*. Parramon France.
- Mendes, D., Caputo, F.M., Giachetti, A., Ferreira, A., Jorge, J., 2019. A Survey on 3D Virtual Object Manipulation: From the Desktop to Immersive Virtual Environments. *Comput. Graph. Forum* 38, 21–45. <https://doi.org/10.1111/cgf.13390>
- Milgram, P., Kishino, F., 1994. A Taxonomy of mixed reality visual displays 15.
- Miller, G.A., 1975. *The Psychology of Communication*, Basic Books. ed.
- Ministère de l'Industrie, 2015. *Nouvelle France Industrielle*.pdf.

- Mollo, V., Nascimento, A., 2013. *Pratiques Réflexives et Développement des Individus, des Collectifs et des Organisations*, P. Falzon. ed, Ergonomie Constructive. PUF, Paris, France.
- Monostori, L., 2014. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP* 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., Ueda, K., 2016. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Ann.* 65, 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Mousa, R., Sunar, M.S., Kolivand, H., Rehman, A., Al-Dhelaan, A., Al-Rodhaan, M., 2015. Marker Hiding Methods: Applications in Augmented Reality. *Appl. Artif. Intell.* 29, 101–118. <https://doi.org/10.1080/08839514.2015.993553>
- Nielsen, J., 1994. *Usability Engineering*, Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies. ed. Morgan Kaufmann.
- Nogier, J.-F., Leclerc, J., 2016. *UX Design et Ergonomie des Interfaces*, 6ème édition. ed. Dunod.
- Nonaka, I., 1991. The Knowledge-Creating Company, in: *The Economic Impact of Knowledge*. Elsevier, pp. 175–187. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7009-8.50016-1>
- Nonaka, I., Takeuchi, H., 2015. *La connaissance créatrice : La dynamique de l'entreprise apprenante*, DE BOECK SUP. ed.
- Norman, D., 1988. *The psychology of everyday things*, Basic books.
- Norman, D., Draper, S., 1986. *User Centered System Design: New Perspectives on Human-computer Interaction*, 1st edition. ed. CRC Press.
- Normand, J.-M., Servieres, M., Moreau, G., 2012a. A typology of augmented reality applications based on their tracking requirements 4.
- Normand, J.-M., Servièrès, M., Moreau, G., 2012b. A new typology of augmented reality applications, in: *Proceedings of the 3rd Augmented Human International Conference on - AH '12*. Presented at the the 3rd Augmented Human International Conference, ACM Press, Megève, France, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1145/2160125.2160143>
- Oudet, S.F., 2012. Concevoir des environnements de travail capacitants :l'exemple d'un réseau réciproque d'échanges des savoirs. *Form. Empl.* 7–27. <https://doi.org/10.4000/formationemploi.3684>
- Oztemel, E., Gursev, S., 2020. A Taxonomy of Industry 4.0 and Related Technologies, in: Hamilton Ortiz, J. (Ed.), *Industry 4.0 - Current Status and Future Trends*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.90122>
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J.A., Roy, R., Torabmostaedi, H., 2018. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robot. Comput.-Integr. Manuf.* 49, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
- Papadopoulos, T., Evangelidis, K., Kaskalis, T.H., Evangelidis, G., Sylaiou, S., 2021. Interactions in Augmented and Mixed Reality: An Overview. *Appl. Sci.* 11, 8752. <https://doi.org/10.3390/app11188752>
- Parveau, M., Adda, M., 2020. Toward a user-centric classification scheme for extended reality paradigms. *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.* 11, 2237–2249. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01352-9>
- Pfaff, G., 1983. *User Interface Management Systems*. Presented at the Workshop on User Interface Management Systems, Held in Seeheim, FRG, p. 224.
- Pook, S., 2001. *Interaction et contexte dans les interfaces zoomables*. ENST, Paris.
- Poupyrev, I., Billinghurst, M., Weghorst, S., Ichikawa, T., 1996. The Go-Go Interaction Technique: Non-linear Mapping for Direct Manipulation in VR 2.

- Poupyrev, I., Ichikawa, T., Weghorst, S., Billinghurst, M., 1998. Egocentric Object Manipulation in Virtual Environments: Empirical Evaluation of Interaction Techniques. *Comput. Graph. Forum* 17, 41–52. <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00252>
- Poupyrev, Ivan, Weghorst, S., Billinghurst, M., Ichikawa, T., 1998. A study of techniques for selecting and positioning objects in immersive VEs: effects of distance, size, and visual feedback 8.
- Pusch, A., Noël, F., 2019. Augmented Reality for Operator Training on Industrial Workplaces – Comparing the Microsoft HoloLens vs. Small and Big Screen Tactile Devices, in: Fortin, C., Rivest, L., Bernard, A., Bouras, A. (Eds.), *Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era*. Springer International Publishing, Cham, pp. 3–13. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42250-9_1
- Rabardel, P., 1995. *Les Hommes et les technologies une approche cognitive des instruments contemporains*, Armand Colin. ed.
- Rajguru, C., Obrist, M., Memoli, G., 2020. Spatial Soundscapes and Virtual Worlds: Challenges and Opportunities. *Front. Psychol.* 11, 569056. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.569056>
- Rieder, J.S.I., van Tol, D.H., Aschenbrenner, D., 2021. Effective close-range accuracy comparison of Microsoft HoloLens Generation one and two using Vuforia ImageTargets, in: *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*. Presented at the 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), IEEE, Lisbon, Portugal, pp. 552–553. <https://doi.org/10.1109/VRW52623.2021.00158>
- Robinson, P., 2001. *Cognition and Second Language Instruction*, Michael H. Long, Jack C. Richards. ed, Cambridge Applied Linguistics.
- Roudaut, A., Lecolinet, E., 2007. Un espace de classification pour l'interaction sur dispositifs mobiles, in: *Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine on - IHM '07*. Presented at the the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine, ACM Press, Paris, France, p. 99. <https://doi.org/10.1145/1541436.1541456>
- Sen, A., 1999. *Development as Freedom*. Oxford University Press.
- Siltanen, S., 2012. *Theory and applications of marker-based augmented reality*. Espoo, Finland: VTT.
- Speicher, M., Hall, B.D., Nebeling, M., 2019. What is Mixed Reality?, in: *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. Presented at the CHI '19: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, Glasgow Scotland Uk, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300767>
- Syberfeldt, A., Danielsson, O., Gustavsson, P., 2017. Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products. *IEEE Access* 5, 9118–9130. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2703952>
- Thüring, M., Mahlke, S., 2007. Usability, aesthetics and emotions in human–technology interaction. *Int. J. Psychol.* 42, 253–264. <https://doi.org/10.1080/00207590701396674>
- Tonnis, M., Plecher, D.A., 2011. *Presentation Principles in Augmented Reality – Classification and Categorization Guidelines Version 1.0* 19.
- Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J.-F., Amiel, A., Lutz, G., Morcillo, A., 2003. Utilité, utilisabilité, acceptabilité: interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH 13.
- Vergnaud, G., 2006. Rabardel Pierre & Pastré Pierre (dir.). *Modèles du sujet pour la conception : dialectiques, activités, développement*: Toulouse : Octarès, 2005. – 260 p. (Travail et activité humaine). *Rev. Fr. Pédagogie* 219–222. <https://doi.org/10.4000/rfp.205>

- Villemain, A., Lémonie, Y., 2014. Environnement capacitant et engagement des opérateurs : une mise en débat à partir de l'activité des techniciens de la base polaire Dumont D'Urville. *Activites* 11. <https://doi.org/10.4000/activites.1063>
- Wang, X., Ong, S.K., Nee, A.Y.C., 2016. A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Adv. Manuf.* 4, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>
- Williges, R., Williges, B., Elkerton, J., 1987. *Software Interface Design.*, G. Salvendy. ed, *Handbook of Human factors.* New-York, Wiley.
- Yan, Y., Chen, K., Xie, Y., Song, Y., Liu, Y., 2019. The Effects of Weight on Comfort of Virtual Reality Devices, in: Rebelo, F., Soares, M.M. (Eds.), *Advances in Ergonomics in Design.* Springer International Publishing, Cham, pp. 239–248. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94706-8_27
- Yanagida, Y., Kawato, S., Noma, H., Tomono, A., Tesutani, N., 2004. Projection based olfactory display with nose tracking, in: *IEEE Virtual Reality 2004.* Presented at the IEEE Virtual Reality 2004, IEEE, Chicago, IL, USA, pp. 43–50. <https://doi.org/10.1109/VR.2004.1310054>
- Zhuang, J., Liu, Y., Jia, Y., Huang, Y., 2019. User Discomfort Evaluation Research on the Weight and Wearing Mode of Head-Wearable Device, in: Ahram, T.Z. (Ed.), *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design.* Springer International Publishing, Cham, pp. 98–110. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94619-1_10

GLOSSAIRE

Affordants : Qui fait preuve d’Affordance. L’affordance est la caractéristique d’un objet qui permet à un individu d’interpréter a priori, le mode d’utilisation et/ou de préhension de cet objet.

Big Data : Ensemble des données transitant au sien d’un réseau. Ces données contiennent des informations variées, circulant à des vitesses élevées et par volumes importants voire très importants. Les professionnels des technologies qui permettent de gérer ces ensembles de donnée parlent de trois « V » à propos du Big Data : Vitesse, Variété, Volume.

Blockchain : La blockchain est une technologie de gestion des données permettant entre autres, une traçabilité infalsifiable. Les données transitant dans la blockchain portent en elles l’intégralité des modifications qui ont été faites depuis leur création.

Business model : Le business model ou modèle d’affaires représente la façon dont est créée la valeur ajoutée dans une entreprise pour un domaine de compétences identifié et sur une période donnée. Par ailleurs, l’intégralité des parties prenantes sont spécifiées dans un modèle d’affaires. L’outil d’analyse CANVAS est le document de référence pour comprendre le business model d’une entreprise.

Capacitant : Nom commun utilisé entre les différentes parties prenantes du projet ANR Collaboration 4.0, pour parler d’une Situation de Collaboration Capacitante. Au sein du manuscrit, nous parlons indifféremment de capacitant ou de situation de collaboration capacitante.

Carte de fréquentation : Représentation graphique des données statistiques qui permettent d’afficher des récurrences d’observation via des nuanciers de couleurs dans une matrice à deux dimensions.

Carte de profondeur : Image numérique qui contient des informations relatives à la distance entre les surfaces des objets d’une scène et la position relative d’où est captée cette image.

Cel shading : voir Ombrage de celluloid.

Centrale à inertie : Instrument utilisé en navigation capable de détecter les mouvements d’un objet afin d’évaluer sa position, son orientation, et sa vitesse par rapport à un référentiel.

Champ de vision : Le champ de vision est l’étendue du monde observable à un moment donné en fonction des aptitudes dont dispose le dispositif de RA. Cette aptitude est due à plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci la corrélation entre la taille de l’écran et les possibilités d’agrandissement fournies par les lentilles est fondamentale.

Coconception avec les acteurs : Activité de conception impliquant toutes les parties prenantes, les utilisateurs finaux notamment, dans le processus de conception et ce, dès son début.

Collimater : De Collimateur. Action d’alignement des faisceaux de lumière provenant d’une source externe dans un dispositif optique.

Collimateur : Dispositif optique servant à aligner un faisceau de rayons de lumière provenant d’une source lumineuse extérieure.

Cybercinétose : Sensation de malaise analogue au mal des transport résultant d’un trouble de la perception visuelle dans un dispositif immersif.

Cybersécurité : Ensemble des éléments mis en place pour protéger les éléments informatiques matériels (ordinateurs, serveurs, etc.) et immatériels (réseaux) d'une organisation (étatique, industrielle, associative, etc.).

Cybersickness : voir Cybercinétose.

Depthmaps : voir Carte de profondeur.

Division du travail : Doctrine visant à accroître la production économique via la complexification du système productif.

Efficacité : Capacité d'un individu à atteindre des objectifs fixés indépendamment des ressources utilisées pour l'atteinte de ces résultats.

Efficiency : Capacité à atteindre des objectifs fixés avec une utilisation optimale des ressources à disposition.

Expérience utilisateur : L'expérience utilisateur ou User eXperience en anglais désigne la qualité de l'expérience vécue par un individu dans une situation d'interaction avec un produit ou une machine.

Facteur Humain : Champ d'investigation au sein duquel les spécialistes analysent l'intervention humaine pour repérer les comportements pouvant, ou ayant, générer des défaillances. Si ce terme désigne à l'origine, des situations plutôt péjoratives, le facteur humain désigne plus largement l'analyse de l'intervention humaine avec un(des) système(s).

Field of View : voir Champ de vision.

Heatmaps : voir Carte de fréquentation.

Industrie 4.0 : Concept allemand de numérisation des chaînes de fabrication afin de contrôler la production en temps réel et ainsi obtenir des gains de productivité qualitatifs, et quantitatifs.

Industrie du futur : Concept d'industrie 4.0 pensé par l'État français. Celui-ci vise à transformer les chaînes de fabrication en y injectant de la technologie mais aussi vise à intégrer les nouvelles exigences environnementales et sociales.

Interfaces Hommes-Machines : Interface utilisateur permettant de faire communiquer un individu avec une machine.

ISO 61158 : Norme internationale parue en octobre 2016. La norme ISO 61158-2 fournit les éléments de normalisation nécessaires à la gestion des canaux de communication utilisés dans les systèmes de contrôle industriel.

Médiate : Qui se passe par l'intermédiaire de.

Métaphore d'interaction : Moyen dédié à interagir avec une machine. Ce moyen peut être basé sur l'un des sens humains : visuel, haptique, auditif, etc. Il est unimodal dans le cas où un sens est sollicité, et multimodal, si les moyens d'interaction sont basés sur plusieurs sens.

Natural User Interfaces : Interface utilisateur naturelle en français. Dans le domaine de l'informatique, ce type d'interface reste invisible et qui devient visible au fur et à mesure que l'utilisateur apprend des interactions de plus en plus complexes.

Obligation d'Employabilité des Travailleurs Handicapés : Obligation légale d'emploi des personnels en situation de handicap. Ce seuil est fixé en France à 6%. Si celui-ci n'est pas atteint, l'entreprise incriminée se voit sanctionnée d'une amende.

Ombre de celluloid : Modèle d'éclairage d'un objet dans le domaine du traitement de l'image. Les techniques utilisées sont le marquage des contours des objets et l'utilisation de palettes de couleurs réduites. De surcroît, une technique de seillage des ombres qui

vient se joindre aux deux techniques précédentes pour ajouter à l'effet « dessin animé » recherché.

Optical See-Through : Système optique de transmission de l'image combinant la transmission d'un objet virtuel généré par un algorithme, à la scène perçue par l'individu « à travers le dispositif », via un système de restitution de l'image. L'image résultante est partiellement synthétique.

Parallaxe : En optique, angle résultant de deux axes optiques visant un même objet. La parallaxe est la résultante d'un changement d'incidence d'observation entre la position de l'outil qui capture et retransmet une image et l'individu qui se situe à une position différente.

Réalité Augmentée : Technologie de superposition d'éléments virtuels au sein d'une interface numérique sans occlusion du monde réel perçu.

Réalité Virtuelle : Technologie qui synthétise la présence physique d'un individu au sein d'un environnement entièrement artificiel et généré par des algorithmes informatiques.

Responsabilité Sociale et Environnementale : Prise en compte volontaire des entreprises aux nouveaux enjeux environnementaux, sociétaux, et éthiques.

Robotique collaborative : Robot ayant pour vocation à officier dans un espace partagé avec un individu humain et destiné à interagir directement avec l'Homme au sein de cet espace.

Satisfaction : Sentiment éprouvé lors de l'accomplissement de tâches répondant à un déroulé souhaité. La satisfaction témoigne de la disparition d'un manque et/ou d'un besoin.

Spirale des connaissances : Concept visant à capturer, transformer, et gérer des connaissances dans une organisation.

Système d'Informations : Ensemble de ressources matérielles et immatérielles permettant de gérer, stocker, et transmettre des informations au sein d'une organisation.

Système de contrôle et d'acquisition de données : Système de contrôle à distance des installations techniques grâce à un réseau de capteurs et d'actionneurs, de bus de communication, et de progiciels de gestion dédiés.

Takt time : Terme industriel associé au Lean Management. Il s'agit de la cadence idéale de production d'un bien industriel pour répondre au besoin du client. La formule du takt time est : $T_T = \frac{\text{Temps disponible}}{\text{NB d'unités souhaitées}}$

Technologies de l'Information et de la Communication : Ensemble des moyens numériques utilisant les techniques du multimédia et les systèmes de télécommunication, qui peuvent créer, envoyer et recevoir, manipuler et transformer l'information à des fins de communication.

Unité de mesure inertielle : Capteur utilisé dans le domaine de l'électronique pour mesurer les vitesses, accélérations et orientations de mobiles dans l'espace. A rapprocher du terme de Centrale à inertie (voir Centrale à inertie). Le terme unité de mesure inertielle est souvent utilisé pour parler du capteur quand le terme, centrale à inertie désigne plutôt l'instrument de navigation.

Vergence : Grandeur physique servant à caractériser les propriétés focales d'un système optique.

Video See-Through : Système de capture d'une scène au sein d'un dispositif permettant la restitution de l'image. La capture est faite par un système de caméras qui capture la scène. Un algorithme gère les données par rapport à un but fixé, et les transmet au système de restitution de l'image. L'image est entièrement synthétique.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Structure de la partie UNE du document.....	11
Figure 2: Structure des parties DEUX et TROIS du manuscrit.....	12
Figure 3: Une classification des technologies dites 4.0 déterminantes dans le cadre de l'industrie du futur. Crédits photo : The Boston Consulting Group.....	15
Figure 4: Part de l'industrie manufacturière dans quelques pays de l'Europe. Source : INSEE.....	16
Figure 5: Sondage sur l'insertion des personnes handicapées dans l'industrie au regard de différents point de vue. Source : Agefiph.....	17
Figure 6: La pyramide d'automatisation selon le modèle ISA 95. Chaque niveau est associé à un type de système (ERP, MES, etc.). D'après (Åkerman, 2018).....	19
Figure 7: Taux de robotisation de quelques grandes nations industrielles mondiales....	20
Figure 8: Un système cyber-physique selon Cardin (Cardin, 2019).....	22
Figure 9: Le continuum des réalités. D'après (Milgram and Kishino, 1994).	25
Figure 10: La différenciation entre RV, RA et Réalité Médiée pour Mann (Mann, 1994).	26
Figure 11: Le modèle de réalité médiée synthétisé par (Parveau and Adda, 2020).	27
Figure 12: Systèmes de RV permettant la RM, (a) Lenovo, (b) HTC Vive Pro, et ne permettant pas la RM, (c) Oculus Go.	28
Figure 13: Classification d'une technologie de RA selon Wang et alii.....	30
Figure 14: Notre classification d'une technologie de RA avec lien avec les CPS (diagramme BPMN des échanges entre mondes).....	32
Figure 15: Notre classification des technologies de RA vis-à-vis des pôles constitutifs d'un CPS.....	33
Figure 16: Montage du casque HMD Hololens 1. Documentation Microsoft.....	33
Figure 17: Le système de Calcul de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.....	34
Figure 18: La fonction Captation de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.....	34
Figure 19: L'ensemble lentilles et écrans de l'Hololens 1. Documentation Microsoft.....	35
Figure 20: Trois types d'architecture de casques mesurés. A gauche, le visiocasque (a), au milieu le casque (b), à droite le casque (c). D'après Yan & alii (Yan et al., 2019).....	37
Figure 21: Évaluation du confort de port des visiocasques selon leur masse et leur architecture. D'après (Yan et al., 2019).	37
Figure 22: (a) Un système de RA Outside-In à gauche. On perçoit les constellations de perception du dispositif par les capteurs externes. (b) A droite, un système de RA Inside-Out. La méthode de suivi est basée sur des marqueurs. D'après (Mallem and Roussel, 2019).....	38
Figure 23: Quelques exemples de marqueurs. D'après (Mousa et al., 2015) et un QR-Code. Ceux-ci peuvent aussi être considérés comme marqueurs.....	39
Figure 24: Détection des points d'intérêts grâce à l'algorithme SURF. L'image de référence est à gauche, la scène à droite. D'après (Havard and Baudry, 2019).....	40
Figure 25: Détection des points d'intérêts à l'aide d'opération de floutage successif de la scène. D'après (Havard, 2018).....	40
Figure 26: Détection du modèle 3D en temps réel. D'après (Havard and Baudry, 2019).	41
Figure 27: Calibration d'un modèle CAO d'un poste de travail sur son jumeau réel.	41
Figure 28: Une augmentation visuelle basée sur les techniques de SLAM.....	42
Figure 29: Comparaison entre un marqueur "complexe" à gauche, et un marqueur « simple » à droite. D'après (Cheng et al., 2017).....	42
Figure 30: La mesure des variations des points placés par les participants par rapport au point idéal (CP). D'après (Rieder et al., 2021).....	43
Figure 31: Le prototype du futur gant haptique de chez Meta. Crédits photo : Facebook Reality Labs.	44

Figure 32: (a) Le système haptique de mâchouille à gauche, (b) le dispositif d'éjection du jet gustatif à droite. D'après (Iwata et al., 2004).	45
Figure 33: Différents types de rendu visuel en fonction de l'architecture de restitution du dispositif de RA. D'après (Havard, 2018; Havard and Baudry, 2019).	46
Figure 34: Les FoV résultant d'une résolution de 30 CPD (Cycle par Degré) pour une image composée de 1920 pixels (FHD) ou de 3840 pixels (UHD). D'après (Lee et al., 2020).	47
Figure 35: Adjectifs les plus couramment donnés selon le type de dalle utilisée et le dispositif de RA. D'après (Han and Suk, 2019).	49
Figure 36: La eyebox est le plan focal par lequel l'individu perçoit l'environnement augmenté au sein de la technologie de RA. La taille de cette eyebox influe donc énormément sur la capacité que possède l'utilisateur à percevoir les détails dont est composé cet environnement. D'après (Lee et al., 2020).	49
Figure 37: Collimateur à bain d'oiseau de l'Hololens 1. D'après (Kress and Cummings, 2017).	50
Figure 38: La technique de combinaison des ondes par décomposition des couleurs de la scène perçue. Un effet arc-en-ciel résulte quand l'angle de diffraction est élevé. D'après (Kress and Cummings, 2017).	51
Figure 39: L'effort physique demandé aux participants par architecture de restitution visuelle. Les technologies avec une fonction Interface importante nécessite un effort plus important que les technologies ayant une interaction Homme-Machine faible voire inexistante. D'après (Alves et al., 2022).	52
Figure 40: Le modèle d'architecture d'une interface homme-machine. D'après (Kolski, 1995).	53
Figure 41: Le modèle de l'interface flexible. D'après (Kolski, 1995).	54
Figure 42: Le modèle de l'interface tolérante aux erreurs humaines. D'après (Kolski, 1995).	55
Figure 43: Le modèle de l'interface « opérateur assistant ». D'après (Kolski, 1995).	56
Figure 44: Cycle de conception en V des IHMs.	57
Figure 45: La méthode en cascade de conception des interfaces.	58
Figure 46: Deux approches possibles pour évaluer une interface conçue. D'après (Kolski, 1995).	58
Figure 47: La prise en compte de l'usage d'un produit selon la notion d'UX. Le produit n'est plus pensé selon des critères intrinsèques (ici, la saveur du ketchup, le packaging attractif) mais aussi en termes d'usage. Crédits photo : Lifelong Learning Institute.	59
Figure 48: A gauche, un espace vectoriel 2D. L'interacteur (la fenêtre des paramètres d'affichage) est décontextualisée car nous ne savons pas dans quel contexte s'insère les « Propriétés de Affichage ». A droite, un espace de représentation 2D contextualisé. La fenêtre s'insère dans l'ensemble des paramètres du système dont l'architecture globale est visible dans le ruban à gauche.	60
Figure 49: Un espace de représentation 3D dans un dispositif de visualisation 2D. Crédits photo : https://www.01net.com/astuces/des-ruses-pour-mieux-bosser-513090.html .	61
Figure 50: Sélection d'un objet à distance avec deux techniques d'interaction différentes : A gauche, la technique Go-Go consistant en un allongement d'un bras virtuel. A droite, le Ray-Casting consistant en un pointeur laser qui viendrait "percuter" l'objet afin de pouvoir le manipuler. Crédits photo: D'après (Mendes et al., 2019).	62
Figure 51: Classification des différentes métaphores d'interaction dans un environnement virtuel en 3D. D'après (Ivan Poupyrev et al., 1998).	62
Figure 52: La technique du AirTap présente dans l'Hololens 2 Permet d'accrocher ou de décrocher un objet du pointeur laser (métaphore du Ray-Casting) émanant de la paume de la main de l'individu.	63
Figure 53: La classification en tâches élémentaires proposée par Bowman et Hodges (Bowman and Hodges, 1999).	64
Figure 54: Taxinomie de classification des techniques d'interaction au sein d'un système immersif interactif. D'après (Papadopoulos et al., 2021).	65
Figure 55: Une classification des techniques d'interaction. D'après (Papadopoulos et al., 2021).	66

Figure 56: La métaphore d'interaction est une construction de deux affordances, matérielle et logicielle, dont la mise à disposition de l'une (affordance réelle), permet le développement possible de l'autre (affordance perçue).....	68
Figure 57: Relocaliser un objet dans l'espace virtuel selon trois types de tâches : 1D, 3D et 6D, et pour deux types d'interfaces, une interface 2D et une autre 3D. D'après (Fechter et al., 2022).....	69
Figure 58: Assembler des objets dans l'espace virtuel deux types d'interfaces, une interface 2D et une autre 3D. D'après (Fechter et al., 2022).....	70
Figure 59: Les résultats d'utilisabilité pour chaque système interactif et la différence de perception. D'après (Fechter et al., 2022).....	70
Figure 60: Le modèle de processeur humain selon Card & alii (Card et al., 1986). D'après (Kolski, 1995).....	72
Figure 61: Le modèle de Bellet. D'après (Bellet, 1998).....	73
Figure 62: Le cycle d'interaction homme-machine dans une interface interactive. D'après (Nogier and Leclerc, 2016).....	73
Figure 63: Le cycle d'interaction homme-machine mise en perspective avec notre classification des technologies de RA. Diagramme repris de (Nogier and Leclerc, 2016) et adapté.....	74
Figure 64: Cycle d'exécution/évaluation de Norman & Draper. D'après (Nogier and Leclerc, 2016).....	76
Figure 65: Décomposition des tâches en sous-tâches pour définir les techniques d'interaction nécessaires dans le cadre du développement d'une interface homme-machine. Extrait de (Bowman and Hodges, 1999).....	77
Figure 66: Aperçu général du fonctionnement d'une HLI. Extrait de (Koper, 2014).....	81
Figure 67: Imbrication des HLIs selon Koper(Koper, 2014).....	82
Figure 68: Le dispositif interactif décrit par Aehnelt et alii. Celui-ci consiste en un chariot sur lequel est disponible une interface d'apprentissage. D'après (Aehnelt and Wegner, 2015).....	85
Figure 69: Une situation de travail pour l'opérateur nommé Work-related control of action. Extrait de (Aehnelt and Wegner, 2015).....	86
Figure 70: Assistance dans une situation nouvelle par l'IHM. Extrait de (Aehnelt and Urban, 2015).....	87
Figure 71: Constitution d'une situation décomposée via le triptyque des faits, procédures et concepts. Extrait de (Aehnelt and Urban, 2015).....	87
Figure 72: Architecture de l'IHM proposée par Aehnelt et alii en 2015 (Aehnelt and Urban, 2015) et (Aehnelt and Wegner, 2015).....	88
Figure 73: L'IHM développée par Aehnelt et Urban (Aehnelt and Urban, 2015) et Aehnelt et Wegner (Aehnelt and Wegner, 2015).....	89
Figure 74: Un environnement d'apprentissage intelligent. Le triptyque technologie 4.0, opérateur et IHM sont au cœur de celui-ci.....	90
Figure 75: Architecture d'une IHM adaptée d'après les travaux de (Aehnelt and Urban, 2015; Aehnelt and Wegner, 2015). Nous faisons le lien ici avec notre classification des technologies.....	91
Figure 76: Processus itératif de transmission des connaissances dans une organisation. D'après Nonaka et Takeuchi (Nonaka, 1991).....	93
Figure 77: Le management milieu-haut-bas préconisé par Nonaka et Takeuchi (Nonaka and Takeuchi, 2015) où le management intermédiaire possède les clés de médiation entre ce qui est et ce qui devrait être	96
Figure 78: Opération guidée ou asynchrone telle que définie par Havard et Baudry (Havard and Baudry, 2019).....	96
Figure 79: Opération assistée ou synchrone telle que définie par Havard et Baudry (Havard and Baudry, 2019).....	97
Figure 80: Notre exemple de syllogisme illustré par la méthode scripto-graphique par hyperliens.....	99
Figure 81: Diagramme BPMN du processus de création et de partage de la connaissance au sein d'une organisation.....	100
Figure 82: L'approche par les capacités. D'après Fernagu-Oudet (Oudet, 2012).....	104

Figure 83: Les différents concepts associés à l'émergence d'un environnement capacitant.	106
Figure 84: La classification des critères d'une situation capacitante. D'après (Compan et al., 2020).	107
Figure 85: Une classification du triptyque acceptabilité-utilité-utilisabilité. D'après Nielsen (Nielsen, 1994).	108
Figure 86: Table de vérité résultante des recherches effectuées par Tricot et alii (Tricot et al., 2003) pour déterminer les relations entre les trois dimensions d'utilité, d'utilisabilité et d'acceptabilité.	109
Figure 87: Corrélation entre les concepts de KM, HLI, et critères du capacitant.	112
Figure 88: Les concepts explicités dans les chapitres III et IV associés aux critères du capacitant de conception continuée dans l'usage et d'instrumentalisation.	113
Figure 89: Les tâches de recherches dévolues à G-SCOP au sein du projet ANR Collaboration 4.0.	117
Figure 90: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°1.	118
Figure 91: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°2.	119
Figure 92: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°3.	120
Figure 93: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°4.	121
Figure 94: Méthodologie de réponse aux questions pour la tâche prescrite n°5.	121
Figure 95: Méthode de Design UX globale. D'après (Lallemant and Gronier, 2018).	123
Figure 96: Le modèle UX d'Hassenzahl. Il peut y avoir dissonance entre le produit conçu par le concepteur et le produit perçu par l'utilisateur. Extrait de (Hassenzahl, 2003).	124
Figure 97: Rappel de la classification des critères d'une situation capacitante. D'après (Compan et al., 2020).	125
Figure 98: Le modèle UX de Thüring et Mahlke. D'après (Thüring and Mahlke, 2007).	127
Figure 99: Les composants et le sous-ensemble. De gauche à droite et de haut en bas : clip noir, clip blanc, cordelette, coulisse et glace de custode.	130
Figure 100: Le poste de formation. (a): la réplique réelle. (b): le modèle CAO.	130
Figure 101: L'étape de calibration dans l'IHM. Ici, les interactions sont fournies par le visiocasque Microsoft Hololens 1ère génération.	131
Figure 102: Quelques vues de l'IHM de 2019. (a): le processus général numéroté de 0 à 7 (hors champ). (b): les informations de montage de l'étape telles qu'elles sont affichées dans le dispositif interactif.	132
Figure 103: Le processus de montage des composants sur la pièce principale. On voit l'écran vidéo montrant les différentes étapes d'assemblage.	132
Figure 104: Vue de l'IHM Rouge et des animations 3D projetées.	133
Figure 105: Une partie du CdC associée à la phase de formation. Chaque fonction est associée à un critère du capacitant.	135
Figure 106: Synoptique du processus revu pour casser sa linéarité.	136
Figure 107: Le QR-Code présent dans le coin avant-gauche sert à la calibration du système interactif.	137
Figure 108: le tableau de bord de l'IHM.	137
Figure 109: Photo de la nomenclature de la tâche prescrite d'assemblage des composants sur la glace de custode.	138
Figure 110: Interacteurs de mise au ralenti ou d'accélération des vidéos. Par ailleurs, nous voyons les affordances d'interaction (cadre entourant le titre de la fenêtre de la vidéo) qui apparaissent lorsque le pointeur entre en collision avec ces affordances.	138
Figure 111: Le choix à effectuer par l'usager en début de phase de production dans l'IHM de formation.	139
Figure 112: Les deux IHMs en notre possession. (a) l'IHM développée en 2019 par Pusch et Noël (Pusch and Noël, 2019); (b) l'IHM que nous avons conçu à l'aide des critères du capacitant.	140
Figure 113: Les deux visiocasques de RA utilisés pour l'étude : (a) Le MICROSOFT Hololens 1 ; (b) Le MICROSOFT Hololens 2.	140
Figure 114: Les trois systèmes que nous considérons. De gauche à droite : (a) S1, Hololens 1 et IHM Rouge ; (b) S2, Hololens 2 et IHM Rouge ; (c) S3, Hololens 2 et IHM Bleue.	141
Figure 115: Infographie de la procédure générale de notre future expérimentation.	143

Figure 116: Les questionnaire AttrackDif2 interroge quatre dimensions : stimulation, identification, attractivité et aspects pragmatiques d'un système.	144
Figure 117: Corrélacion effective ou non ? Évaluation de la pertinence des critères du capacitant par rapport à une HLI d'Identification. Les marques rouges prospecteront ce lien éventuel.....	149
Figure 118: Répartition Hommes/Femmes dans l'étude expérimentale.	151
Figure 119: Répartition par classe d'âge dans l'étude expérimentale.....	152
Figure 120: Répartition des opinions sur les technologies de RA des participants de l'étude expérimentale.	152
Figure 121: Répartition des expériences de la RA parmi les participants de l'étude expérimentale.....	153
Figure 122: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S1 (Hololens1/IHM Rouge) puis S2 (Hololens 2/IHM Rouge).	154
Figure 123: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S1 puis S2.....	155
Figure 124: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S1 puis S2.....	155
Figure 125: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S2 puis S1.....	156
Figure 126: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S2 puis S1.....	157
Figure 127: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S2 puis S1.....	157
Figure 128: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S2 (Hololens 2/IHM Rouge) puis S3 (Hololens 2/IHM Bleue).	158
Figure 129: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S2 puis S3.....	159
Figure 130: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S2 puis S3.....	159
Figure 131: Moyennes des questionnaires SUS et USE calculées selon la condition de passation S3 puis S2.....	160
Figure 132: Moyennes des qualités pragmatiques QP et hédoniques QH calculées selon la condition de passation S3 puis S2.....	160
Figure 133: Moyennes de l'attractivité globale du système considéré selon la condition de passation S3 puis S2.....	161
Figure 134: Comparaison du critère d'utilité en fonction des ordres de passage et des hypothèses formulées.....	162
Figure 135: Comparaison du critère de sensibilité en fonction des ordres de passage et des hypothèses formulées.....	163
Figure 136: Valeurs moyennes mesurées pour les dimensions de l'UX pour les trois systèmes étudiés lors de notre expérimentation.....	163
Figure 137: Valeurs globales d'utilisabilité et d'utilité pour les trois systèmes.	164
Figure 138: Échelle de Brooke de la dimension d'utilisabilité. D'après Gronier.	164
Figure 139: Valeurs globales pragmatiques et hédoniques pour les trois systèmes.....	165
Figure 140: Valeurs globales d'attractivité pour les trois systèmes.	165
Figure 141: Signification des zones de description de l'orientation du système.	166
Figure 142: Portfolio des résultats du questionnaire AttrackDif2. Les systèmes sont positionnés au sein de ce portfolio.....	166
Figure 143: Nuages des mots pour chaque système. Les différenciateurs sémantiques positifs sont représentés en vert, les négatifs en rouge. La taille des termes évoqués est corrélée au nombre de fois et aux notes données par les participants lors de la complétion du questionnaire AttrackDif2.	168
Figure 144: Ratio des performances par système, pour chaque sous-tâche prescrite au sein de la tâche d'assemblage de la glace de custode.....	170
Figure 145: Utilité de la mise en place des critères du capacitant eu égard à la complexité des tâches prescrites.	171
Figure 146: Tableau récapitulatif de la significativité des résultats des systèmes entre eux par rapport aux dimensions UX considérées.	173

Figure 147: La matrice de corrélation mise à jour à l'aune de l'étude expérimentale menée.	175
Figure 148: Missions principales remplies par les ingénieurs et techniciens du bureau des méthodes.	176
Figure 149: Synoptique général de notre heuristique de création d'activité.	177
Figure 150: Les cinq étapes de création de l'activité de collaboration Homme-Machine.	178
Figure 151: La taskBOM de notre expérimentation. Chaque élément utile à la tâche est spécifié (outil, composant, assemblage, machine) afin que le besoin de l'activité soit mis en perspective au travers des caractéristiques géométriques, et dimensionnelles de ces éléments. Ces caractéristiques sont disponibles via les fichiers joints (photos, modèles CAO ou tout autre fichier de cet ordre).	178
Figure 152: Ontologie de décomposition des processus au niveau de l'usine.	179
Figure 153: Un exemple de décomposition d'une tâche prescrite au sein d'un processus. Le cas lié à notre étude expérimentale.	180
Figure 154: Décomposition de l'opération de montage du clip noir sur la glace de custode via les traitements élémentaires opérés dans l'IHM.	181
Figure 155: État des lieux du classeur de création d'activité pour l'opération "Assembler Clip Noir sur Glace de Custode".	182
Figure 156: Interacteurs définis sur la base de la taxonomie des interactions Homme-Machine définies par Papadopoulos et alii (Papadopoulos et al., 2021).	183
Figure 157: Positions et rotations des interacteurs au sein de l'interface par rapport au QR-Code.	183
Figure 158: Vue finale de l'étape d'assemblage du clip noir dans l'IHM.	184
Figure 159: Un exemple de "contact-analog" dans un dispositif de RA, ici un système HUD (Head-Up Display). Source : https://gpstracklog.com/2014/07/sci-fi-meets-reality-with-new-hud-display.html .	186
Figure 160: Détail des entités par classe considérées utilisées dans la spécification des interfaces Homme-Machine.	187
Figure 161: Matrice de corrélation entre l'identité des interfaces et technologies de RA.	188
Figure 162: Matrice de corrélation entre l'identité des interfaces et notre taxonomie des technologies de RA.	189
Figure 163: Première étape de l'heuristique de choix du dispositif. La classification des interfaces permet la corrélation entre les spécificités des interfaces et les technologies de RA.	190
Figure 164: Filtrage des dispositifs et visualisation des informations en fonction d'arguments non liés à la taxonomie des interfaces.	190
Figure 165: La matrice de corrélation et l'étude expérimentale future qui pourrait être menée à l'avenir.	195

ANNEXES

Annexe 1

<i>Désignation de la spécificité :</i>	CA.1 – Afficher un indicateur de progression si le temps de chargement est conséquent			
<i>Critères du capacitant visés :</i>	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3a <input checked="" type="checkbox"/>	3b <input type="checkbox"/>
<i>Synoptique de la tâche :</i>	<u>Hors processus</u> de complétion des tâches d'assemblage			
<p>Écran de l'IHM : Afficher un indicateur de progression lors de la phase de calibration avec QR-Code : https://docs.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/mrkt-unity/features/ux-building-blocks/progress-indicator?view=mrtkunity-2021-05 La partie algorithmique de l'objet <i>IProgressIndicator Interface</i> : https://docs.microsoft.com/fr-fr/dotnet/api/microsoft.mixedreality.toolkit.ui.iprogressindicator?view=mixed-reality-toolkit-unity-2020-dotnet-2.7.0 La documentation pour le suivi du regard : https://docs.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/mrkt-unity/features/input/gaze?view=mrtkunity-2021-05 https://docs.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/mrkt-unity/features/input/eye-tracking/eye-tracking-basic-setup?view=mrtkunity-2021-05</p>				
<div style="text-align: center;">  </div> <p>Une barre de ce type : avec la mention « calibration en cours ». Cette barre serait à ajouter au dessus du QR-Code comme ceci :</p> <div style="text-align: center;">  </div>				
<i>Taxonomie Navigation & Sélection/Manipulation de Bowman & Hodges :</i>	Navigation : <i>Néant</i>			
	Sélection : Indication of object - InternalGazePointer			
	Manipulation : <i>Néant</i>			
<i>Taxonomie des métaphores d'interaction de Poupyrev :</i>	Egocentric – Virtual Pointer Metaphor			
<i>Taxonomie des métaphores d'interaction de Papadopoulos :</i>	Visual-Based – Location-Based – QR-Code Recognition			
<i>Paramètres Processus QCD :</i>	Délai : Réduction du temps de calibration grâce à une calibration automatique de la CAO sur le modèle réel.			

Annexe 2

Zone d'affichage du processus

Vidéos Infobulles
 Animations 3D Tracés de contours

Zone des widgets :
Horloge, Agenda, ...

Vidéo d'assemblage en arrière plan qui tourne

Fleche de detection

Boîte qui contient les clips noirs

Fleche de detection

Animation 3D de l'assemblage En Cel-Shading

Poste de travail

Infobulle: « Assemblez le clip noir sur la glace de custode. »

Retour auditif: « ...jusqu'à entendre un « clic » »

Next step

Bouton « Étape suivante »

Zone des performances

Zone d'affichage du processus

Vidéos Infobulles
 Animations 3D Tracés de contours

Zone des widgets :
Horloge, Agenda, ...

Poste de travail

Infobulle: « Valider l'opération d'assemblage ? »

Next step

Bouton « Étape suivante »

Zone des performances

Zone d'affichage du processus

Vidéos Infobulles
 Animations 3D Tracés de contours

Zone des widgets :
Horloge, Agenda, ...

Infobulle: « Veuillez sélectionner une étape d'assemblage parmi celles disponibles (en jaune) »

Poste de travail

Next step

Bouton « Étape suivante »

Zone des performances

Annexe 3

Fonction Assemblage Clip Noir

État précédent l'entrée dans cette fonction :

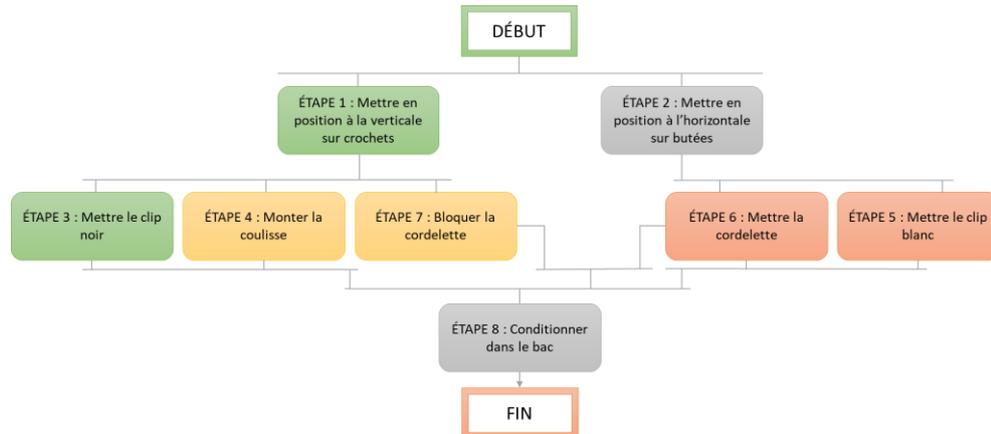
0. L'arrivée à cette étape est conditionnée par le clic du bouton « Étape Suivante » de la fonction « Position Verticale ».

Étapes du processus :

1. L'IHM indique l'emplacement de l'objet dans la boîte et l'emplacement cible. La vidéo d'assemblage tourne en boucle en arrière-plan et le relâchement de la pièce est indiqué via le feedback auditif natif dans l'ancienne IHM.
2. L'opérateur prend la pièce indiquée dans l'IHM par une flèche et la positionne à l'endroit indiqué par l'autre flèche. Les hologrammes permettent d'ajuster l'orientation et la position de la pièce dans l'espace. L'IHM désactive les indices visuels de détection au fur et à mesure que l'opérateur a réalisés ces tâches élémentaires (colliders des mains dans les zones requises) ;
3. L'opérateur valide le positionnement en cliquant sur le bouton « Étape Suivante » ;

État suivant la sortie de cette fonction :

4. Étape validée, passage de l'icône au **vert**. Appel des fonctions 4, et 7. Les boutons de sélection de ces tâches restent **jaunes**. Les fonctions 5 et 6 sont toujours rejetées, leur bouton de sélection de tâches reste **rouge**.



L'opérateur doit cliquer sur l'étape de processus qu'il souhaite engager (une étape disponible = jaune). L'IHM doit donc lui fournir l'indication de cliquer sur l'une des étapes : « Veuillez sélectionner une étape parmi celles disponibles (en jaune) ».

Éléments d'interaction :

- Rectangles devenus jaunes -> étapes de processus à choisir.
- Bouton de passage à l'étape suivante.

Métaphores d'interaction de Poupyrev utilisées :

- Validation par pression du doigt (direct).
- Validation par Ray-Cast et AirTap.

Décomposition en tâches élémentaires : (voir figure 154)

Scénarisation de l'étape : (voir annexe 2)

Annexe 4

Questionnaire SUS. Extrait de (Brooke, 1996)

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

Questionnaire USE.

Crédits photo : <https://garyperlman.com/quest/quest.cgi?form=USE>

USEFULNESS		1	2	3	4	5	6	7	NA
1. It helps me be more effective. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
2. It helps me be more productive. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
3. It is useful. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
4. It gives me more control over the activities in my life. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
5. It makes the things I want to accomplish easier to get done. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
6. It saves me time when I use it. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
7. It meets my needs. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○
8. It does everything I would expect it to do. ☑	Désaccord	○	○	○	○	○	○	○	Accord ○

Annexe 5

GUIDE D'ENTRETIEN AVEC LE PARTICIPANT

La couleur des questions induit le type de questions que l'on souhaite poser : **questions ouvertes**, **questions semi-ouvertes** (souligner les détails de la question qui poussent à cadrer la réponse), **questions fermées**.

SENTIMENT GÉNÉRAL SUR L'EXPÉRIMENTATION VÉCUE

1-**Pouvez-vous nous décrire votre vécu lors de la passation de la première condition ?** (HOLOLENS 1/HOLOLENS 2) versus (IHM ancienne/IHM récente) – Barrez les mentions inutiles

2-**Pouvez-vous nous décrire votre vécu lors de la passation de la seconde condition ?** (HOLOLENS 1/HOLOLENS 2) versus (IHM ancienne/IHM récente) – Barrez les mentions inutiles

3-**Diriez-vous que la condition n (1 ou 2) est plus efficace que la condition m (1 ou 2) ?** Car j'ai noté que [arguments donnés par le participant et basés sur les deux questions précédentes]. **Et pourquoi ?**

VÉRIFICATION DE LA VALIDITÉ DES CRITÈRES DU CAPACITANT AU TRAVERS DU SYSTÈME (Expliciter auprès du participant ce que l'on entend par système [Système = Visiocasque + IHM])

CRITÈRE n°1 : Performances + Utilité + Sensibilité à

Largement mesurés dans les questionnaires donnés à la sortie du vécu de chaque condition. La question de ce questionnaire a pour objectif de comparer qualitativement les performances vécues sur les systèmes des deux conditions.

4-Si vous deviez comparer les performances à l'usage, des deux systèmes au poste de formation, que diriez-vous à ce propos ?

5-Quel système trouvez-vous le plus acceptable si l'on devait l'implanter sur une ligne de production ? **Et pourquoi ?**

CRITÈRE n°2 : Marge de Manœuvre Situationnelle

[Définition de la marge de manœuvre situationnelle (MMS) à donner au participant = Consiste à permettre à l'opérateur de pouvoir adapter la séquence des tâches en fonction de ses souhaits/volontés].

6-Pour la première condition, quel ordre d'assemblage avez-vous suivi ?

7-Pensez-vous que le système vous donnait le choix de suivre un autre ordre ? **Si non, que pensez-vous de cette absence de choix d'ordre ?**

8-Pour la seconde condition, quel ordre d'assemblage avez-vous suivi ?

9-Pensez-vous que le système vous donnait le choix de suivre un autre ordre ? Si non, que pensez-vous de cette absence de choix d'ordre ?

CRITÈRE n°3.1 : Transparence Opérative

[Définition de la transparence opérative à donner au participant = Consiste à comprendre le système, ce dont il a besoin pour fonctionner, par rapport à la situation en cours. L'opérateur sait alors s'il doit intervenir ou non sur le système. Le système fournit des informations utiles à son utilisateur pour qu'il puisse comprendre ce qu'attend éventuellement le système ET qu'il puisse recevoir des conseils sur les interactions possibles au sein de ce système].

10-Pour la première condition, que pensez-vous de votre compréhension du système ?

11-Auriez-vous souhaité plus d'aide en provenance du système pour le comprendre ? Si oui, pouvez-vous nous donner quelques exemples qui vous ont manqué pour le comprendre ?

12-Pour la seconde condition, que pensez-vous de votre compréhension du système ?

13-Auriez-vous souhaité plus d'aide en provenance du système pour le comprendre ? Si oui, pouvez-vous nous donner quelques exemples qui vous ont manqué pour le comprendre ?

CRITÈRE n°3.2 : Instrumentalisation

[Définition de l'instrumentalisation à donner au participant = Consiste à modifier le système, pour l'adapter à sa situation de travail, au travers de l'affichage ou non d'informations contextuelles, de cochage/décochage d'options, mais aussi par l'ajout de conseils et/ou de « best practices » à la communauté des opérateurs du site de production].

14-Pour la première condition, que pensez-vous des possibilités que vous aviez à pouvoir modifier le système ?

15-Avez-vous pu modifier le système à votre guise ? Pourquoi ?

16-Pour la seconde condition, que pensez-vous des possibilités que vous aviez à pouvoir modifier le système ?

17-Avez-vous pu modifier le système à votre guise ? Pourquoi ?

POUR ALLER PLUS LOIN

18-Avez-vous quelques aspects du système à commenter que nous n'aurions pas abordé précédemment ?

Annexe 6



Comité d'Éthique pour les Recherches de Grenoble Alpes – CERGA

Objet : Avis éthique consultatif

Compte tenu des éléments fournis dans la demande d'avis sur le projet « [Évaluation de l'impact de la maturité des technologies de Réalité Augmentée et de la conception de leurs Interfaces Homme-Machine \(IHM\) sur la réplique d'un poste de formation pour l'industrie automobile](#) » présenté par Frédéric Noël du Laboratoire G-SCOP de l'Université Grenoble Alpes, à Grenoble, le Comité d'Éthique pour les Recherches de Grenoble Alpes émet un AVIS FAVORABLE.

Il relève de la responsabilité des chercheurs de se conformer à leurs obligations légales notamment en ce qui concerne :

- La loi n°2012-300 du 5 mars 2012 relative aux recherches impliquant la personne humaine – dite loi Jardé (voir les articles L. 1121-1 et suivants du Code de la santé publique). Cette loi implique que les recherches organisées et pratiquées sur l'être humain en vue du développement des connaissances biologiques ou médicales doivent être examinées par un Comité de Protection des Personnes (CPP). Des sanctions pénales sont prévues aux articles L. 1126-1 à L. 1126-12 du Code de la santé publique. La qualification de la recherche comme relevant ou non de cette loi n'appartient pas au CERGA.
- Les traitements de données à caractère personnel (données personnelles) soumis aux législations (1) européenne : Règlement général (UE) 2016/679 sur la protection des données (RGPD) et (2) française : Loi du 6 janvier 1978 modifiée (loi « informatique et libertés »).
- L'homologation du lieu de recherche et les assurances.
- Les mesures sanitaires mises en œuvre sur le lieu de recherche.

Numéro de l'avis : CERGA-Avis-2022-11

A Grenoble, le 06/05/2022

La Présidente du CERGA,
Carole Peyrin
Université Grenoble Alpes

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'C. Peyrin', written over a horizontal line.

Annexe 7

Formulaire d'INFORMATION et de CONSENTEMENT À LA PARTICIPATION

Remis aux personnes sollicitées pour participer à cette expérimentation de recherche

Investigateur principal :

David BASLÉ – Doctorant G-SCOP

Responsable scientifique :

NOËL Frédéric – Laboratoire G-SCOP

Lieu de passation de l'expérimentation :

G-SCOP, Équipe Conception Collaborative, Bâtiment R, Salle R006

46 avenue Félix Viallet 38013 Grenoble Cedex 1 - France

Objectif de la recherche :

Évaluer l'apport des technologies dans l'aide à la formation au travers de leur niveau de maturité et valider des pratiques de conceptions des IHMs ayant pour objectif de rendre, ou de tendre, vers des situations de travail et/ou de formations plus capacitantes.

Méthodologie :

Nous souhaitons pouvoir vérifier les critères de définition d'une situation de formation industrielle où les opérateurs interagissent avec un dispositif de réalité augmentée afin de les aider dans l'apprentissage des gestes à tenir au poste considéré.

Pour cela, vous êtes invité à procéder au montage de 5 composants sur une vitre arrière de véhicule sur la réplique d'un poste de formation existant dans l'industrie automobile. Le dispositif de Réalité Augmentée (RA) sera choisi au hasard ainsi que l'interface homme-machine avec laquelle vous interagirez. Deux passations seront nécessaires pour mesurer : l'évolution de l'interface homme-machine ou l'évolution du dispositif de réalité augmentée suivant le résultat de la carte tirée par vous au hasard. Chaque passation durera au MAXIMUM 17 minutes (il est bien entendu possible de prendre moins de temps) pendant lesquelles vous interagirez avec le système de réalité augmentée pour procéder au montage.

A la fin de chaque passation, vous aurez un questionnaire de satisfaction à l'utilisation du système de RA sur le poste de formation à remplir en ligne. A la fin des deux passations, nous débattons succinctement sur votre expérience vécue et sur vos préférences lors d'un court entretien enregistré.

Durant tout le temps de l'expérience, vous serez filmé par une caméra qui capturera votre attitude en interaction avec le dispositif de RA. Par ailleurs, une connexion Wi-Fi avec un ordinateur à proximité capturera la scène perçue par vous-même au travers du visiocasque. Nous verrons grâce à l'écran déporté, ce que vous verrez dans le visiocasque, éléments virtuels compris (voir image ci-dessous) :



Le dispositif de RA est un visiocasque qui doit être porté sur la tête. Celui-ci possède une masse de 560 grammes. De plus, il s'agit d'un dispositif projetant des hologrammes sur la rétine. Ces hologrammes ne constituent en rien un danger pour le porteur du dispositif car celles-ci sont non invasives.

Vous avez la possibilité d'arrêter à tout moment l'expérience si vous en formulez la demande sans que cela n'entraîne de conséquences pour vous. Les images et voix collectées ne seront jamais diffusées dans des colloques ou à la communauté scientifique.

J'ai lu et compris les consignes, j'ai obtenu des réponses à toutes les questions que j'ai posé et je suis volontaire pour participer à cette expérimentation. Je reconnais par ailleurs consentir à la captation de ma voix et de mon image telles que décrites ci-dessus.

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.

Je donne mon consentement pour autoriser le laboratoire à se servir des données récoltées* à des fins de recherche UNIQUEMENT et ce, pour la durée des études de l'investigateur principal.

Fait à [lieu]

, le [date]

Signature

Cochez cette case si vous souhaitez obtenir les résultats de cette étude et renseignez votre adresse mail en conséquence :

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre exemplaire est conservé et archivé sous la responsabilité de la responsable scientifique du projet.

***Conformément au règlement général sur la protection des données (RGPD), je dispose d'un droit d'accès aux données me concernant et le cas échéant de suppression** de ces données, que je peux exercer auprès de Frédéric NOËL (frederic.noel@grenoble-inp.fr).**

****J'ai été informé que le droit de suppression des données me concernant ne peut pas s'exercer si cela porte préjudice aux objectifs poursuivis, notamment modifie le protocole ou les résultats de la recherche.**

Annexe 8

Formulaire préliminaire

*Obligatoire



1. Quel avis portez-vous sur les technologies de réalité augmentée ? *

1: Très négatif / 2: Négatif / 3: Légèrement négatif / 4: Neutre / 5: Légèrement positif / 6: Positif / 7: Très positif

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	6	7	
Très négatif	<input type="radio"/>	Très positif						

2. Avez-vous déjà utilisé des dispositifs de réalité augmentée ? (utilisation ludique, domestique et/ou professionnelle) *

1: Jamais / 2: Une fois ou deux / 3: Rarement / 4: Plusieurs fois / 5: Souvent / 6: Très souvent / 7: Tous les jours

Une seule réponse possible.

	1	2	3	4	5	6	7	
Jamais	<input type="radio"/>	Tous les jours						

3. Quel est votre âge ? *

4. Quel est votre sexe ? *

Une seule réponse possible.

- Féminin
 Masculin

5. Quel est votre niveau d'études ? *

Une seule réponse possible.

- Baccalauréat et inférieur
 DUT, BTS, DEUG (Bac+2)
 Licence (Bac+3)
 Master (Bac+4, Bac+5)
 Doctorat (Bac+8)

6. Quelle est votre langue maternelle ? *

Une seule réponse possible.

- Français
 Autre : _____

7. Avez-vous des problèmes de vue ? *

Une seule réponse possible.

- Oui
 Non

En cas de problèmes de vue

8. Portez-vous un moyen de correction pour cette expérimentation ? *

Une seule réponse possible.

- Oui
 Non