



HAL
open science

Conception et pilotage d'un système de production Humain-cyber-physique : apport de la méthode CWA

Quentin Berdal

► **To cite this version:**

Quentin Berdal. Conception et pilotage d'un système de production Humain-cyber-physique : apport de la méthode CWA. Automatique / Robotique. Université Polytechnique Hauts-de-France, 2022. Français. NNT : 2022UPHF0012 . tel-03851331

HAL Id: tel-03851331

<https://theses.hal.science/tel-03851331>

Submitted on 14 Nov 2022

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

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

Thèse de doctorat
Pour obtenir le grade de Docteur de
l'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE
et l'INSA HAUTS-DE-FRANCE

Discipline :
Automatique, productive

Présentée et soutenue par Quentin BERDAL.

Le 02/09/2022, à Valenciennes (France)

École doctorale :

École Doctorale Polytechnique Hauts-de-France (ED PHF n°635)

Unité de recherche :

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH – UMR 8201)

Conception et pilotage d'un système de production Humain-cyber-physique : apport de la méthode CWA

JURY

Président du jury

- Koehl, Ludovic. Pr., ENSAIT, Roubaix.

Rapporteurs

- Cardin, Olivier. MCF HDR, Université de Nantes.
- Bonjour, Eric. Pr., Université de Lorraine.

Examineur

- Klement, Nathalie. MCF, LISPEN - Arts et Métiers, Lille.

Co-directeurs de thèse :

- Trentesaux, Damien. Pr., INSA Hauts-De-France. Valenciennes.
- Chauvin, Christine. Pr., Université Bretagne Sud. Lorient.
- Pacaux-Lemoine, Marie-Pierre. IR HDR, Université Polytechnique Hauts-de-France. Valenciennes



Conception et pilotage d'un système de production Humain-cyber-physique : apport de la méthode CWA © 2022 by Quentin Berdal is licensed under Attribution-NonCommercial 4.0 International. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

RESUME

Les systèmes industriels évoluent régulièrement depuis plus d'un siècle, avec à la clef trois grandes révolutions. Alors que la quatrième révolution se profile et gagne en intérêt auprès de la communauté scientifique, certains défauts persistent. Chaque nouvelle révolution tend à repousser l'humain plus loin du système qu'il ne l'était auparavant, au point de négliger les contraintes inhérentes à une activité humaine. Dans un contexte où l'être humain est, de manière paradoxale, de plus en plus indispensable au bon fonctionnement du système industriel et à la gestion de l'imprévu, force est de constater qu'il doit faire face à une complexité croissante des processus à piloter sans être suffisamment aidé dans sa tâche. Nos travaux s'intègrent dans ce contexte et promeuvent la conception d'un système offrant à l'opérateur les moyens de s'intégrer et de piloter les processus industriels grâce à une approche favorisant la coopération entre humains et systèmes artificiels. Dans cette thèse nous justifions l'usage et exploitons une méthode de conception intégrée, le *Cognitive Work Analysis*. Cette méthode permet de considérer non seulement l'aspect technique du système industriel à piloter, mais également l'aspect humain grâce à une approche qui tient compte de ses spécificités. Ces travaux sont développés dans le contexte de l'industrie du futur. Une analyse est tout d'abord menée puis une approche de conception est proposée. Cette dernière se base sur un mécanisme fondamental, celui d'une coopération adaptée entre un humain superviseur et un système industriel composé d'entités autonomes. Pour valider nos propositions, une plateforme originale a été conçue et développée. Des protocoles expérimentaux ont été définis et des expérimentations menées. Ces dernières montrent que, sous certaines conditions, la coopération permet d'améliorer la performance industrielle dans un contexte où sans coopération il serait difficile pour l'humain d'appréhender la complexité du système industriel.

Mots-clefs : Industrie 4.0 ; Industrie du future ; Système Cyber-Physique ; Coopération Homme-Machine ; Cognitive Work Analysis ; Jumeaux numériques

ABSTRACT

Industrial systems are constantly evolving for almost two centuries, resulting in three major revolutions. Although the upcoming fourth revolution is steadily catching more interest from the scientific community, some defaults remain. Each new revolution tends to push humans back further from the systems than they were before, up to the point of overlooking the constraints linked to human activities. In a context where humans are, paradoxically, a growing necessity for the good operation of industrial systems and the management of unforeseen events, we cannot ignore the fact humans are to face a growing complexity from the processes to operate without receiving adequate support. Our work belongs to this problematic and promote the design of a system in which the operator is offered means of integrating himself into the system and operating industrial processes, thanks to an approach fostering cooperation between humans and artificial systems. In this thesis, we justify the usage and then exploit an integrated design method, namely the Cognitive Work Analysis. This method enables the consideration not only of the technical aspect of a system, but of the human aspect too thanks to an approach which integrate this aspect at its core. Our work is carried in the context of future industrials systems. An analysis if carried out first, before suggesting a design approach. This approach is based on a fundamental mechanism, that of an adapted cooperation between a human supervisor and an industrial system constituted of autonomous entity. In order to validate our proposals, an original platform has been designed and developed. Experimental protocols have been defined and multiple experiments has been carried out. Those last ones demonstrate than, under certain conditions, the cooperation can increase industrial performance in a context where, without cooperation, it would be difficult for humans to grasp the complexity of those industrial systems.

Keywords: Industrie 4.0 ; Cyber-Physical system ; Human-Machine Cooperation ; Cognitive Work Analysis ; Digital Twin

REMERCIEMENT

Pour tous ceux qui m'ont soutenu lors de cette thèse, que ce soit par leur connaissance, leur savoir-faire, leur sagesse, ou simplement en étant présent lorsque j'en ai eu le plus besoin. A ceux qui ont supporté au quotidien mes sauts d'humeurs en fonction du développement de la thèse. A ceux qui m'ont armé du savoir nécessaire pour faire face au défi que représente une thèse. Pour ceux qui sont partis trop tôt pour partager cette réussite, mais qui m'ont soutenu toute ma vie. C'est grâce à vous tous que ce chapitre de ma vie peut enfin être clôturé. Je vous remercie tous du fond du cœur, car sans vous, j'aurai abandonné avant la fin.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	15
CHAPITRE 1 : HUMAINS ET SYSTÈMES INDUSTRIELS CYBER-PHYSIQUES.....	21
1. LES SYSTÈMES DE PRODUCTION	21
2. L'INDUSTRIE 4.0 ET LES SYSTÈMES CYBER-PHYSIQUES	27
2.1 <i>Les technologies clefs</i>	28
2.2 <i>Synergies entres piliers technologiques et champs d'application</i>	32
3. LA NOTION D'INTELLIGENCE APPLIQUÉE AU CONTRÔLE	35
4. LA PLACE DE L'HUMAIN DANS LE CONTRÔLE DE SYSTÈMES DE PRODUCTION	38
5. CONCLUSION.....	42
CHAPITRE 2 : MODÈLES DE CONCEPTION INTÉGRANT L'HUMAIN : ÉTAT DE L'ART.....	43
1. L'INGÉNIERIE SYSTÈME	43
2. UNE CONCEPTION CENTRÉE SUR L'HUMAIN.....	45
2.1 <i>Interaction avec le système</i>	46
2.2 <i>Organisation du travail et allocation des tâches</i>	49
3. MÉTHODES DE CONCEPTION INTÉGRÉE.....	50
3.1 <i>Hierarchical task analysis</i>	51
3.2 <i>Cognitive Work Analysis</i>	52
3.3 <i>Modèle de Coopération Humain-Machine</i>	55
4. LE CHOIX DU CWA	57
5. CONCLUSION.....	59
CHAPITRE 3 : ANALYSE ET CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION HUMAIN-CYBER-PHYSIQUE À L'AIDE DU CWA	61
1. DESCRIPTION ET ANALYSE DU SYSTÈME.....	62
1.1 <i>Analyse du domaine de travail (WDA)</i>	62
1.2 <i>Analyse des tâches contextuelles (ConTA)</i>	67
1.3 <i>Analyse des stratégies (StrA)</i>	73
1.4 <i>Analyse de l'organisation sociale et de la coopération (SOCA)</i>	74
1.5 <i>Analyse des compétences des opérateurs (WCA)</i>	79
2. ANALYSE DES DONNÉES OBTENUES.....	80
3. CONCLUSION.....	80

CHAPITRE 4 : CONCEPTION D'UNE PLATEFORME EXPÉRIMENTALE : MICRO-MONDE D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION HUMAIN-CYBER- PHYSIQUE.....	83
1. LIMITES DES PLATEFORMES DE VALIDATION EXISTANTES	83
2. LA PLATEFORME HUMANISM	84
2.1 <i>Spécifications</i>	85
2.2 <i>Implémentation</i>	90
3. INTERFACES ET SYSTÈMES D'AIDE À LA DÉCISION	95
CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATIONS.....	101
1. PREMIÈRE EXPÉRIMENTATION	101
1.1 <i>Organisation</i>	102
1.2 <i>Procédure</i>	105
1.3 <i>Résultats et discussion</i>	109
2. SECONDE EXPÉRIMENTATION	116
2.1 <i>Organisation et procédure</i>	116
2.2 <i>Résultats et discussion</i>	119
3. RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES	122
3.1 <i>Cluster issu des données objectives</i>	122
3.2 <i>Cluster issu des données subjectives</i>	124
4. CONCLUSION.....	127
CONCLUSION.....	129
1. LIMITES.....	132
2. PERSPECTIVES	133
BIBLIOGRAPHIE.....	135
ANNEXES.....	145

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 ORGANISATION FONCTIONNELLE SELON LA NORME IEC 62264-3 (BANGEMANN ET AL. 2014).....	25
FIGURE 2 REPRESENTATION D'UN SYSTEME CYBER-PHYSIQUE INDUSTRIEL (CARDIN ET AL. 2021)	32
FIGURE 3 ILLUSTRATION DU PRINCIPE DE CHAMP DE POTENTIEL SUR UNE CELLULE DE PRODUCTION 2D ; LES MACHINES W2 ET W7 SONT PLUS PRODUCTIVES QUE W5 ET EMETTENT DONC UN CHAMP PLUS FORT	34
FIGURE 4 L'HUMAIN MAGIQUE : COMMENT L'HUMAIN EST VU PAR L'AUTOMATICIEN.....	39
FIGURE 5 SCHEMA DU MODELE HIERARCHIQUE DE MICHON (1985).....	48
FIGURE 6 SCHEMA EXPLICATIF DU BORNAGE DU DOMAINE DANS LEQUEL L'HUMAIN AGIT	52
FIGURE 7 SCHEMA DE L'ABSTRACTION-DECOMPOSITION SPACE.....	53
FIGURE 8 SCHEMA D'UNE ÉCHELLE DECISIONNELLE (A) ET DU « CONTEXTUAL ACTIVITY TEMPLATE » (B).....	54
FIGURE 9 WORK DOMAIN ANALYSIS DU SYSTEME DE PILOTAGE ET SUPERVISION D'UN SYSTEME MANUFACTURIER INTELLIGENT	63
FIGURE 10 TRANSITIONS ENTRE LES DIFFERENTES SITUATIONS POSSIBLES AU SEIN DU SYSTEME	68
FIGURE 11 ÉCHELLE DECISIONNELLE DU CHANGEMENT D'OBJECTIF	69
FIGURE 12 ÉCHELLE DECISIONNELLE DE L'INCIDENT MINEUR	70
FIGURE 13 ÉCHELLE DECISIONNELLE DE L'INCIDENT MAJEUR	71
FIGURE 14 ÉCHELLE DECISIONNELLE DE L'INCIDENT EXTERNE	72
FIGURE 15 SOCA APPLIQUE A LA HIERARCHIE D'ABSTRACTION (AH) ; AGENTS ARTIFICIELS EN ORANGE, AGENTS HUMAINS EN BLEU.....	76
FIGURE 16 SOCA LORS D'UN CHANGEMENT D'OBJECTIF ; AGENTS ARTIFICIELS EN ORANGE, AGENTS HUMAINS EN BLEU.....	77
FIGURE 17 SOCA DE LA GESTION D'INCIDENT MINEUR ; AGENTS ARTIFICIELS EN ORANGE, AGENTS HUMAINS EN BLEU.....	77

FIGURE 18 SOCA DE LA GESTION D'INCIDENT MAJEUR ; AGENTS ARTIFICIELS EN ORANGE, AGENTS HUMAINS EN BLEU.....	78
FIGURE 19 SOCA LORS DE LA GESTION D'UN INCIDENT EXTERNE ; AGENTS ARTIFICIELS EN ORANGE, AGENTS HUMAINS EN BLEU.....	79
FIGURE 20 ARCHITECTURE BASEE SUR UN JUMENT NUMERIQUE	88
FIGURE 21 SCHEMA DE L'ARCHITECTURE INTEGREE DE LA PLATEFORME HUMANISM BASEE SUR LES DEUX PLATEFORMES AREZZO S.MART ET SUCRE	92
FIGURE 22 RECONSTRUCTION PHYSIQUE DE LA CELLULE S.MART	93
FIGURE 23 SCHEMA DE L'IMPLEMENTATION TECHNIQUE DE LA PLATEFORME	94
FIGURE 24 INTERFACE DE PRODUCTION	96
FIGURE 25 INTERFACE DE PLANIFICATION.....	97
FIGURE 26 OPERATIONS A REALISER PAR TYPE DE PRODUIT	103
FIGURE 27 OPERATIONS DISPONIBLES PAR MACHINE, AVEC LE TEMPS DE REALISATION ET LA CONSOMMATION ASSOCIES, AINSI QUE LA CAPACITE DE STOCKAGE MAXIMUM DE MATIERE PREMIERE (1 OPERATION = 1 UNITE CONSOMMEE).....	103
FIGURE 28 FRISE CHRONOLOGIQUE DES EVENEMENTS (E) PERTURBATEURS	104
FIGURE 29 RELATION ENTRE L'EXPERIENCE DANS LES JEUX DE GESTION/STRATEGIE (ABSCISSE) ET LA CHARGE DE TRAVAIL RESSENTIE (ORDONNEE) ; $P=0.0424 (<0,05)$	110
FIGURE 30 RELATION ENTRE L'EXPERIENCE DANS LES JEUX DE GESTION/STRATEGIE (ABSCISSE) ET L'EXIGENCE MENTALE ESTIMEE (ORDONNEE) A GAUCHE ET L'EXIGENCE TEMPORELLE PONDEREE (ORDONNEE) A DROITE ; RESPECTIVEMENT $P=0.0433 (<0,05)$ ET $P=0.03132 (<0,05)$	111
FIGURE 31 RELATION ENTRE L'EXPERIENCE DANS LES JEUX DE GESTION/STRATEGIE (ABSCISSE) ET L'EVALUATION DE LA DETECTION (Q6) (ORDONNEE) A DROITE ET LA GESTION (Q7) DES CONFLITS PAR LES NAVETTES (ORDONNEE) A DROITE ; RESPECTIVEMENT $P=0.01178 (<0,05)$ ET $P=0.00136 (<0,05)$	111
FIGURE 32 RELATION ENTRE L'EXPERIENCE AVEC LES ROBOTS (ABSCISSE) ET LE SCORE OBTENU (ORDONNEE) ; $P=0.03948 (<0,05)$	112

FIGURE 33 RELATION ENTRE CONDITION EXPERIMENTALE (ABSCISSE) ET LA DEMANDE MENTALE (ORDONNEE) ; $p=0.017258 (<0,05)$	113
FIGURE 34 LES DIFFERENTS COEFFICIENTS DE CORRELATION SIGNIFICATIFS AVEC L'EVALUATION DE L'ENTRAINEMENT	114
FIGURE 35 VUE DE LA CELLULE PAR CAMERA	117
FIGURE 36 COMPARAISON DE LA MOYENNE DES INDICATEURS DE PERFORMANCES ET RESULTATS DU TEST DE SIGNIFICATIVITE ENTRE LA PREMIERE EXPERIMENTATION ET LA SECONDE	119
FIGURE 37 COMPARAISON DU NASA TLX ENTRE LA PREMIERE EXPERIMENTATION ET LA SECONDE	120
FIGURE 38 PONDERATION DES FACTEURS DU NASA TLX EN POURCENTAGE POUR LES ORGANISATIONS 1 ET 2.....	121
FIGURE 39 COMPARAISON DU QUESTIONNAIRE DE COOPERATION HOMME-MACHINE ENTRE LA PREMIERE EXPERIMENTATION ET LA SECONDE	122
FIGURE 40 RESULTAT DE L'ANOVA SUR LE CLUSTER BASE SUR LE SCORE DE PRODUCTION ET L'UTILISATION DE LA SIMULATION, AVEC LE CENTRE DES CLUSTERS (HABIB ET AL. 2021)	123
FIGURE 41 MOYENNE DES RESULTATS DES PARTICIPANTS PAR GROUPE ET RESULTAT DU TEST DE SIGNIFICATIVITE (HABIB ET AL. 2021).....	123
FIGURE 42 RESULTAT DE L'ANOVA SUR LE CLUSTER BASE SUR LA CONSOMMATION ET LA SURCONSOMMATION, AVEC LE CENTRE DES CLUSTERS (HABIB ET AL. 2021)	124
FIGURE 43 RESULTAT DE L'ANOVA SUR LE CLUSTER BASE SUR LE QUESTIONNAIRE DE COOPERATION HOMME-MACHINE, AVEC LE CENTRE DES CLUSTERS (HABIB ET AL. 2021)	124
FIGURE 44 MOYENNE DES RESULTATS DES PARTICIPANTS PAR GROUPE ET RESULTAT DU TEST DE SIGNIFICATIVITE (HABIB ET AL. 2021).....	125
FIGURE 45 RESULTAT DE L'ANOVA SUR LE CLUSTER BASE SUR LES FACTEURS PONDERES DU NASA TLX ET LA CHARGE DE TRAVAIL, AVEC LE CENTRE DES CLUSTERS (HABIB ET AL. 2021).....	126
FIGURE 46 MOYENNE DES RESULTATS DES PARTICIPANTS PAR GROUPE ET RESULTAT DU TEST DE SIGNIFICATIVITE (HABIB ET AL. 2021).....	126

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

- CPS : « Cyber-Physical System », Système cyber-physique
- CWA : « Cognitive Work Analysis », Analyse du travail cognitif
- WDA : « Work Domain Analysis », Analyse du domain de travail
- ConTA : « Contextual Tasks Analysis », Analyse des tâches contextuelles
- StrA : « Strategy Analysis », analyse des stratégies
- SOCA : « Social Organisation and Cooperation Analysis », analyse de l'organisation sociale et de la coopération
- WCA : « Worker Competencies Analysis », analyse des compétences de l'opérateur
- KH : « Know-How », Savoir-faire
- KHC : « Know-How to Cooperate », Savoir-coopérer
- MES : « Manufacturing Execution System »
- MAS : « Multi-Agent System », système multi-agent
- HMS : « Holonic Manufacturing System », système manufacturier holonique
- IS : Ingénierie Système
- AGV : « Autonomously guided vehicle », véhicule à guidage autonome

INTRODUCTION

Le rôle de l'humain dans les systèmes industriels a évolué et continue d'évoluer au fil des différentes révolutions industrielles. Ces révolutions modifient à chaque fois en profondeur non seulement l'acte de production mais aussi la manière avec laquelle l'humain est impliqué dans ces systèmes. Dans notre société, la notion de production occupe clairement une place centrale. Le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL) définit la production comme étant l'« *Ensemble des activités qui permettent à l'homme de créer et de s'approprier les produits de l'agriculture, de l'industrie, ou d'assurer les services permettant de satisfaire les besoins de la société* ». Selon cette définition, il s'agit principalement de satisfaire les besoins de notre société au travers de services ou de la création de biens. Or, les besoins ont évolué avec le temps et avec eux la façon d'aborder la production. Le point important ici n'est pas de savoir lequel des deux engendre l'autre, mais plutôt d'observer ces mutations de la production, notamment dans la création de biens, et leurs implications sur la relation entre l'humain et le processus de production.

Les premiers métiers en production de biens relevaient de l'artisanat, avec pour maîtres d'œuvres des artisans suivant la définition suivante : « *Personne exerçant, pour son propre compte, un art mécanique ou un métier manuel qui exige une certaine qualification professionnelle* » (CNRTL). Deux éléments clefs sont à souligner dans cette définition. Premièrement, le fait que l'artisan « *exerce pour son propre compte* » signifie que l'activité est décentralisée. Ainsi, si dans la pratique plusieurs personnes peuvent travailler ensemble, notamment dans le cadre d'un apprentissage, un artisan accompli réalisera seul son activité et sera en concurrence avec les autres artisans. Deuxièmement,

cette définition souligne que l'être humain est seul responsable de la création de biens, bien que des outils puissent être nécessaires à la réalisation de la tâche afin d'exploiter plus efficacement le temps et l'énergie fournie. Ces outils sont devenus de plus en plus complexes, mais la transmission de l'énergie nécessaire et la réalisation de la tâche sont restées principalement du domaine de l'être humain.

Avec le développement de la mécanique et l'invention de machines pouvant fournir de l'énergie, notamment la machine à vapeur, une nouvelle façon d'aborder la production a vu le jour : l'industrialisation. Le CNTRL définit l'industrie comme suit : « *Ensemble des activités économiques (caractérisées par la mécanisation et l'automatisation des moyens de travail, la centralisation des moyens de production et la concentration de la propriété des moyens de production), ayant pour objet l'exploitation des sources d'énergie et des richesses minérales du sol ainsi que la production de produits fabriqués à partir de matières premières ou de matières ayant déjà subi une ou plusieurs transformations* ». Avec l'industrialisation, il n'est plus question pour l'être humain d'achever un bien par son seul travail. Des machines viennent désormais l'assister ou le suppléer dans sa tâche, augmentant le débit de production et réalisant des tâches qui pouvaient se révéler impossibles auparavant. Nous retrouvons cette notion dans la définition générale d'une machine : « *Objet fabriqué complexe capable de transformer une forme d'énergie en une autre et/ou d'utiliser cette transformation pour produire un effet donné, pour agir directement sur l'objet de travail afin de le modifier selon un but fixé* » (CNRTL). Ce modèle et ces nouvelles technologies ont mis en avant les compétences de l'être humain, en éliminant les composantes de la production ne relevant pas ou peu du savoir-faire. L'industrie textile est un bon exemple ; avec la combinaison du métier à tisser et de l'apport d'énergie de la machine à vapeur, l'activité principale de l'être humain est devenue celle de la création des motifs dans le tissu et du contrôle de qualité. Ce changement majeur dans la façon d'aborder la production est considéré comme une révolution à part entière tant l'impact fût important sur la société.

Ce modèle s'est maintenu, avec des améliorations constantes et notamment au travers d'une nouvelle révolution industrielle avec l'exploitation de l'électricité et l'organisation scientifique du travail proposée par Taylor. Cette révolution a eu pour principal impact l'hyperspécialisation du savoir-faire de l'être humain, appelé par la suite opérateur. Les opérateurs n'étaient plus en charge d'un produit, mais d'une seule étape de la réalisation qu'ils apprenaient à réaliser le plus parfaitement possible. Cela a permis d'augmenter les

volumes de production par l'élimination progressive des temps morts, liés notamment aux temps de réflexion et de changement de tâche.

Cependant, avec le développement de l'informatique, une troisième révolution industrielle a vu le jour. Le terme français est explicite quant au domaine couvert par l'informatique : l'information automatisée, ou plus précisément l'acquisition et le traitement automatisé de l'information. Avec l'introduction de cette automatisation, certaines tâches ne nécessitaient plus l'intervention de l'être humain. En effet, des tâches répétitives et hyperspécialisées, considérées alors comme aliénantes étaient facilement automatisées par la combinaison d'une machine et d'un ordinateur. De plus, de par l'automatisation du traitement de l'information, il est devenu possible de prendre et d'appliquer des décisions en suivant un protocole établi sans intervention humaine. Le processus de remplacement de l'être humain en tant qu'élément clef de la production s'est alors enclenché ; l'humain se tournant désormais vers les emplois plus qualifiés.

Nous pouvons ainsi observer comment, dans notre histoire récente, l'être humain a été extrait progressivement de la boucle du processus de production pour évoluer vers des missions de contrôle et de supervision de processus qui sont d'autant plus difficiles à contrôler que leur complexité s'accroît.

Prenons pour illustrer nos propos l'exemple des cellules de production : ce sont des regroupements de machines, réalisant de façon autonome une tâche et pouvant être reconfigurées qui sont desservies et connectées par des systèmes (convoyeurs, etc.) qui les alimentent en matière première et/ou produits à réaliser. Ces cellules sont relativement isolées de l'extérieur, de telle sorte qu'un opérateur ne peut intervenir sur une machine sans provoquer un arrêt de la cellule par mesure de sécurité. L'activité principale de l'opérateur est alors de reconfigurer les machines et préparer les plans de production afin de pouvoir répondre aux commandes. Une autre activité qui lui incombe est de surveiller les machines, de les entretenir et d'agir dans les cas où une machine ne serait pas en mesure de gérer une situation par elle-même. Présenté ainsi, il apparaît que les machines ont une place centrale dans la production et que l'activité humaine est organisée autour de celles-ci et réduite soit à la surveillance de la production, soit à la gestion des situations jugées non nominales.

Une centralisation des compétences de production s'opère et amène à une nouvelle notion : celle de *système* de production. Un système est généralement considéré comme un ensemble d'entités réalisant une ou plusieurs tâches et ayant une interaction entre elles,

le plus souvent avec un but commun. Au cours de cette troisième révolution s'est également développé le concept de « système sociotechnique ». Ce second terme, combinaison de l'aspect social inhérent à l'humain et de l'aspect technique propres aux machines, exacerbe le fait que l'être humain contribue autant à la réalisation du système que la partie automatisée et que les deux sont amenés à interagir. Cela peut sembler contradictoire avec le fait que l'être humain tende à être remplacé, mais la réalité a souvent montré qu'il est impossible de se passer de l'être humain car les systèmes industriels dont la complexité ne cesse de s'accroître sont toujours faillibles et l'environnement dans lesquels ils évoluent ne cesse également de présenter une part croissante d'incertitude. De nombreuses tâches deviennent alors trop complexes ou nécessitent une réflexion car sortent du cadre connu. Ce sont des activités impossibles à automatiser. Il faut également noter que les systèmes automatisés se sont développés différemment selon les cultures et les domaines d'application. Ainsi, si certains industriels cherchent à limiter fortement l'implication des êtres humains, d'autres au contraire font encore appel à de nombreux opérateurs humains, notamment pour leur savoir-faire ou encore pour réaliser des opérations trop délicates pour que leur automatisation soit envisageable.

Un problème issu de l'automatisation excessive de ces systèmes prend une importance croissante : en maintenant l'être humain en dehors d'un système dont la complexité ne cesse de s'accroître, celui-ci se sent exclu de l'ensemble et perd progressivement ses compétences. Le système industriel tend à devenir une entité inadaptée à l'intervention humaine. Bainbridge (1983) parle notamment d'ironie pour exprimer le fait que l'automatisation semble attrayante pour limiter l'erreur humaine, mais qu'elle demande à l'opérateur, dans le même temps, d'être capable de reprendre en main le système lorsque la situation devient complexe alors même que le système n'a pas été conçu pour cette situation. Cet état de fait tend à devenir de plus en plus flagrant dans le cadre de l'industrie 4.0, qui promeut des systèmes toujours plus autonomes pouvant même disposer d'une capacité d'apprentissage.

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de cette quatrième révolution industrielle. Ils cherchent à résoudre ce problème d'incompatibilité croissante entre l'opérateur et son système industriel. L'organisation de cette thèse est ainsi la suivante : un premier chapitre présentera les caractéristiques principales des systèmes industriels notamment dans un contexte 4.0. La problématique de l'opérateur et de sa place dans le système sera abordée plus en détail. Pour ce faire nous partirons du postulat que l'industrie 4.0 repose sur des

systèmes industriels cyber-physiques, c'est-à-dire des systèmes industriels traitant à la fois de manière intégrée de la dimension physique des éléments, mais aussi de la dimension numérique (cyber) où des données sont captées, agrégées et exploitées à différents horizons temporels pour différentes boucles de décisions, de pilotage et de supervision impliquant l'humain.

Un deuxième chapitre proposera un état de l'art sur les approches considérant l'intégration de l'humain dans ces systèmes industriels cyber-physiques. Cet état de l'art nous permettra de justifier notre choix pour une méthode de conception particulière, le Cognitive Work Analysis (CWA).

Le troisième chapitre portera sur l'application de cette méthode, au travers de cinq étapes, pour analyser et spécifier un système industriel cyber-physique intégrant l'humain. Cette analyse, réalisée pour un horizon décisionnel « bas » (temps réel et court terme) pour une fonction de supervision et de pilotage d'une production de type manufacturière (système flexible de production), nous permettra de spécifier une aide efficace pour l'humain dans ses tâches de pilotage et de supervision au travers d'une coopération pertinente.

Le quatrième chapitre portera sur la spécification et l'implémentation d'une plateforme expérimentale dénommée HUMANISM. Cette plateforme expérimentale a pour objet de tester et valider différentes stratégies d'aide et de coopération entre l'humain et les différentes entités d'autonomie variable composant le système industriel cyber-physique. L'accent sera mis à la fois sur les prérequis techniques, mais également sur les considérations liées à l'interaction entre agents humains et agents techniques. Les interfaces et les systèmes d'aide conçus à l'aide du CWA seront présentés en détail, puisqu'ils constituent les principales contributions de ce travail de thèse.

Pour finir, le cinquième chapitre présentera nos expérimentations et proposera une discussion sur les résultats obtenus. Dans ce chapitre, deux phases expérimentales seront présentées.

Une conclusion générale ainsi qu'un exposé des perspectives envisageables concluront nos travaux. Ces dernières portent en partie sur la poursuite des travaux menés autour du CWA et sur l'élargissement des travaux menés à d'autres contextes applicatifs, au-delà du contexte purement industriel.

CHAPITRE 1 : HUMAINS ET SYSTEMES INDUSTRIELS CYBER-PHYSIQUES

Les systèmes de production automatisés sont au cœur de l'industrie moderne. Ces systèmes subissent depuis quelques décennies des améliorations technologiques constantes. Afin de mieux comprendre cette évolution et ses enjeux, ce chapitre se propose de cerner le contexte de nos travaux (i.e. le rôle de l'humain dans ces nouveaux systèmes industriels cyber-physiques) puis d'identifier les problématiques scientifiques que nous traiterons dans la suite du document. Pour ce faire, nous proposons dans un premier temps de comprendre l'organisation actuelle de la production. Par la suite, les évolutions en cours seront abordées en précisant les technologies clés impliquées. Une nouvelle notion, celle d'intelligence des systèmes, sera exposée, ce qui nous permettra de présenter et discuter du concept de système industriel cyber-physique. Ce chapitre s'achèvera avec une présentation des enjeux relatifs à ces mutations ; enjeux concernant notamment la place de l'humain.

1. Les systèmes de production

Un système est généralement considéré comme un ensemble d'éléments interagissant entre eux (Von Bertalanffy 1972). Naudet et al. (2009) ajoutent que ces éléments « *are forming a whole that functions for a specific finality in an environment* ». Il existe des travaux précisant la définition d'un système (Backlund 2000). Cependant, pour notre étude la définition donnée précédemment apparaît suffisante, car elle souligne les aspects les plus importants, à savoir la présence d'éléments interdépendants ayant un ou plusieurs objectifs partagés. Dans le cas où un système combine l'aspect social inhérent à l'humain et l'aspect technique des machines, il est question de « système sociotechnique » (Cooper and Foster 1971; Appelbaum 1997; Ropohl 1999; Carayon 2006). Sans se limiter à la relation entre un utilisateur et une machine, les travaux sur les systèmes sociotechniques

tendent à traiter à la fois l'intégration de la technologie dans des structures organisationnelles humaines et la relation entre les différents sous-groupes mixtes (humain et machine) au sein de cette organisation. Cette approche du système exacerbe le fait que l'opérateur humain et la machine contribuent tous les deux à la finalité du système et que les deux sont amenés à interagir non seulement directement, mais aussi indirectement au travers des multiples activités qui composent un système.

Cela peut sembler contradictoire avec le fait que les évolutions technologiques tendent à remplacer progressivement l'humain au sein des systèmes de production. La réalité est que l'opérateur humain reste indispensable au fonctionnement de tout système de production, ce qui rend la transition vers un système de production purement technique improbable. Les systèmes sociotechniques sont, en effet, de nature complexe et soumis à perturbation, de par leurs capacité à prendre des décisions en environnement non entièrement structuré ou spécifié (Brehmer 1992). Les capacités d'adaptation humaines permettent de transposer le savoir lié à une situation particulière vers une nouvelle situation et d'en extraire les connaissances nécessaires à la gestion de cette nouvelle situation. C'est notamment cette faculté permettant à l'humain d'apporter une réponse face à l'inconnu ou l'incertain qui limite l'automatisation des systèmes. En effet, de nombreuses tâches sont encore trop complexes pour être automatisées entièrement. Il est possible de supposer que, les avancées technologiques s'accroissant au fil du temps, la quantité de tâches automatisables augmentera de même et atteindra un point où l'humain ne sera plus nécessaire. Cependant, la complexité croissante des opérations réalisées, ainsi que les exigences demandées à ces systèmes sociotechniques augmenteront certainement dans le même temps, de même la complexité des tâches restantes. De notre point de vue, cette tendance laissera toute sa place à l'humain. Il faut malgré tout prendre en considération le fait que cette complexification des tâches rend de plus en plus délicates les prises de décisions humaines. Au-delà de la prise de décision, il est également presque impossible pour un système de gérer les pannes qui peuvent survenir sans intervention humaine, à la fois pour stabiliser le système et pour le restaurer. Il faut également noter que les systèmes automatisés se sont développés différemment selon les cultures et les domaines d'application. Ainsi, si certains de ces systèmes limitent fortement l'implication des opérateurs humains, d'autres au contraire continuent à faire appel à de nombreux opérateurs, notamment pour leur savoir-faire ou encore pour réaliser des opérations trop délicates pour que leur automatisation soit possible. Par exemple, de nombreux constructeurs automobiles privilégient souvent l'intervention de l'opérateur humain dans

l'assemblage des pièces d'un véhicule, et celle de la machine dans la production des dites pièces. Le terme de « machine » est ici utilisé pour désigner les éléments à la fois autonomes et artificiels du système. L'implication de l'opérateur humain et de la machine dans le processus de production reste donc très dépendante du type d'activité et du degré de complexité du processus, lui-même variable en fonction des technologies impliquées. Une première problématique apparaît dès lors que l'on veut concevoir un système industriel intégrant l'humain : **comment s'assurer de la bonne intégration de l'humain dans ces systèmes ?** Il s'agit à la fois de la place de l'humain dans le système et des tâches qui lui sont confiées, mais également de sa relation avec le reste du système. Comment interagit-il avec le système ? Comment le système interagit-il avec lui ? Les interactions et les tâches confiées posent-elles un problème pour l'humain ? Répondent-elles à ses attentes ? La présence d'opérateurs humains est un gage de flexibilité du système, notamment grâce aux facultés d'adaptation et la capacité de réaliser de nombreuses tâches différentes, mais cela signifie également qu'il y a autant de possibilités d'organisation différentes pour le système.

Le type de système de production peut également avoir un impact sur l'implication de l'opérateur humain. Il existe trois grands types de systèmes de production (Woodward 1958, 1980), dont les deux seconds relèvent globalement de ce que l'on peut appeler la production manufacturière (production discrète), par opposition aux industries de process (production continue) :

- Dans une production continue, le système de production, ou au moins une sous-partie, est dédié à la production d'un élément. La production est définie par une ou plusieurs grandeurs continues (poids, volume, composition, ...) ayant peu ou aucune variation. Ce système inclut peu l'opérateur humain ou le cantonne à un rôle de supervision, car les tâches sont souvent répétitives, pour des constantes de temps bien trop rapides ou bien trop lentes pour l'humain et qui sont aisément automatisables. La nature continue du processus permet l'usage des outils mathématiques et techniques du monde continu (régulateur, systèmes mécaniques...). La principale, voire la seule exception pouvant rendre l'automatisation peu rentable ou inapplicable concerne les tâches requérant un savoir-faire important. La complexité de certaines tâches, ou simplement le besoin de sens particulièrement développé chez l'être humain (sens du touché par exemple), font qu'une minorité de tâches au sein du processus doivent encore être confiées à des opérateurs.

- Dans la production par lot, en grande ou en petite série, le système de production va produire des lots caractérisés par le fait que les produits présentent des variations dans les gammes opératoires. Deux lots peuvent être très différents, avec ou sans temps de changement de série. Ce système tend à inclure l'opérateur humain non seulement pour sa capacité à superviser la production, mais aussi à s'adapter face à la variabilité durant la production, ou à réaliser des tâches difficilement automatisables ou pour lesquelles l'automatisation n'est pas jugée rentable. Ces systèmes sont typiquement caractérisés par un potentiel de flexibilité et de reconfigurabilité qui fournit un potentiel d'adaptation qu'il convient cependant d'exploiter correctement. La complexité de ce type de production (en ligne, en atelier, etc.) provient ainsi de la complexité des flux de production à gérer, ainsi que de la diversité des machines et systèmes utilisés.
- Dans la production unitaire (sur commande, sur projet), une pièce généralement unique et/ou ayant un aspect complexe, est réalisée sur mesure. Ce type de production dépend en général fortement de l'opérateur humain car l'automatisation de tâches variées et peu répétitives n'est généralement pas rentable et les pièces réalisées nécessitent le plus souvent un savoir-faire important. Chaque pièce étant en soi un nouveau projet, l'incertitude est très forte et la complexité relève ici de l'absence de vision claire sur les différents futurs proches possibles et les performances que l'on peut obtenir. Il peut par exemple être nécessaire de réaliser une pièce avec différents procédés jusqu'à obtenir des caractéristiques correspondant à celles fournies par le client. C'est notamment le cas lors de prototypage. Il n'est également pas impossible que le client, une fois les résultats obtenus, demande des changements.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le secteur de la production manufacturière où les opérations sont décrites par un ensemble fini d'activités menées sur un ensemble fini de produits identifiables par un système de production ; on s'intéressera, en particulier, à un système de production de type atelier flexible. De nombreuses recherches portent sur la caractérisation des systèmes de production et sur leur modélisation (Schultz et al. 1998; Wiendahl and Breithaupt 1999; Scholz-Reiter et al. 2002). En théorie, il existe de nombreuses organisations différentes et spécialisées pour ces types de système de production.

Cependant, selon Bangemann et al. (2014), bien que plusieurs organisations existent, de nombreux systèmes de production suivent au final une organisation fonctionnelle en 5 niveaux telle que définie dans la norme ISA-95 / IEC 62264 :

- La planification de l'activité et la logistique
- L'opération et le contrôle de l'activité manufacturière
- La surveillance, la supervision et le contrôle du système de production
- Les capteurs et actionneurs du système
- Le processus de production

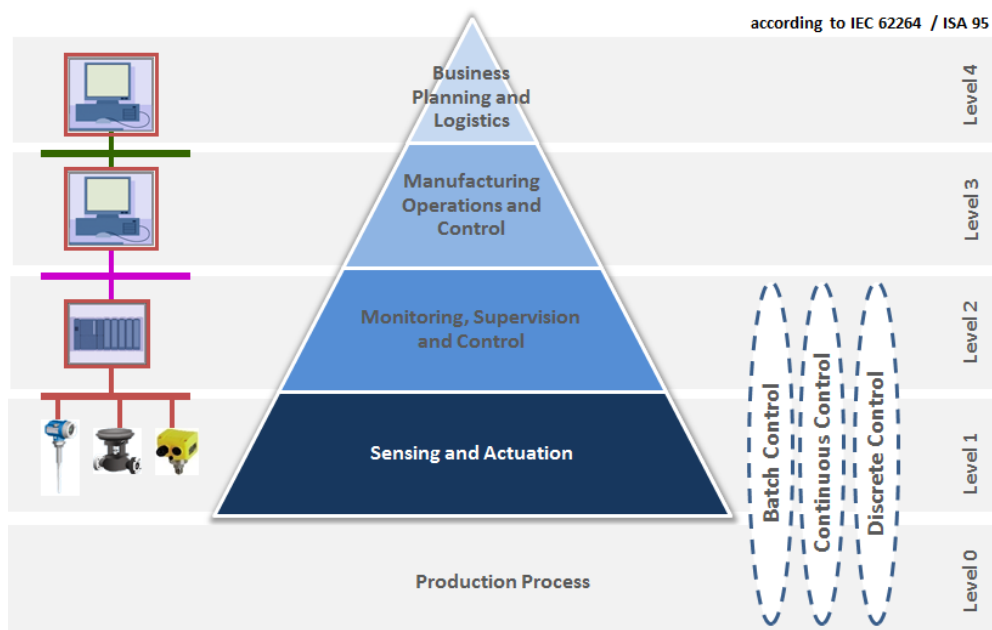


Figure 1 Organisation fonctionnelle selon la norme IEC 62264-3 (Bangemann et al. 2014)

Il est important de noter que la méthode à employer pour réaliser les fonctions nécessaires à chaque niveau n'est pas spécifiée. Ainsi, suivant l'approche choisie lors de la conception, certaines des fonctions peuvent être amenées à recouvrir un niveau autre que celui spécifié initialement. Il n'est donc pas impossible d'avoir des fonctions répondant aux caractéristiques de plusieurs niveaux. Bangemann et al. (2014) utilisent comme exemple la gestion de la maintenance, qui peut apparaître dans un « Enterprise Resource Planning » (ERP ; niveau 4), un « Manufacturing Execution System » (MES ; niveau 3) ou encore un système de contrôle distribué (DCS ; niveau 2). Il ne faut donc pas considérer les frontières entre chaque niveau comme étant strictes, ce qui tend à être renforcé par le niveau de flexibilité attendu du système (Scott 1988). Il est possible

d'interpréter cette situation comme une coopération entre les niveaux, établie afin de respecter au mieux la finalité du système.

Dans cette représentation par niveau, les trois types de systèmes présentés précédemment (production continue, par lot, à la pièce) ne concernent que les trois derniers niveaux du modèle. Si les trois derniers niveaux peuvent comprendre une participation variable de l'opérateur humain, comme présentée précédemment, les deux premiers niveaux ont, quant à eux, tendance à privilégier son implication.

Ce constat rejoint notre propos précédent sur la complexité d'automatiser des tâches complexes qui sont susceptibles d'impliquer des analyses et prises de décisions inédites. Les besoins en compétences humaines sur les postes nécessitant ce type d'activité tendent donc à perdurer, quel que soit le type de système considéré. Cependant les opérateurs humains sont confrontés à une automatisation croissante de l'activité de production ainsi qu'à une complexification croissante des processus industriels. L'opérateur humain fait également face à une complexification croissante en termes de performance attendue : le triptyque historique coût/délai/qualité se voit désormais augmenté d'attentes plus larges, telles que les attentes environnementales (consommation d'énergie, rejet de polluants (Prabhu et al. 2015; Trentesaux and Giret 2015)). Cela rend la gestion de production plus complexe qu'elle ne l'a jamais été du point de vue de l'opérateur. Cet aspect est important, car les opérateurs humains ne peuvent prendre de bonnes décisions sans comprendre le fonctionnement du système dont la complexité ne cesse ainsi d'augmenter. La prise de décision mais aussi la mise en œuvre des décisions sont des tâches compliquées, car les systèmes de production automatisés ne sont généralement pas conçus pour coopérer avec un opérateur humain (Trentesaux and Millot 2016). Une seconde problématique apparaît dès lors : comment concevoir un système d'aide destiné à l'opérateur et lui permettant de prendre les décisions adéquates, éventuellement en coopération avec des éléments techniques dont l'autonomie et l'intelligence ne cessent de s'accroître ?

Actuellement, une grande partie de l'activité de supervision et de contrôle s'appuie sur l'informatique au sens large du terme, aussi appelée technologie de l'information et de la communication (TIC). La plupart des données sont collectées, voire traitées de façon automatisée avant d'être communiquées aux opérateurs humains. Lorsqu'une décision est prise, avec ou sans assistance de la part du système d'information (par exemple, un MES – manufacturing execution system), l'opérateur n'a généralement pas d'autres choix que d'utiliser ce même système d'information pour transmettre ses ordres au système final. Charge ensuite au système d'information de communiquer les ordres aux différentes

machines du système de production. Une grande partie des interactions sont donc indirectes et restreintes par les capacités du système d'information, bien que des interventions manuelles puissent encore être nécessaires. Cette façon de contrôler le système de production s'amplifie à mesure que le développement des TIC se poursuit, intégrant de plus en plus de fonctions et centralisant plus d'informations. Il s'agit de la base des systèmes Cyber-Physiques qui seront présentés dans la partie suivante.

Si cet interfaçage entre l'opérateur et le système place l'opérateur en retrait, cela offre en contrepartie de nombreuses opportunités de développement. Plusieurs technologies sont en effet développées pour les systèmes d'informations (en dehors du cadre industriel) dans le but d'en démultiplier les capacités et fonctionnalités. Il est donc possible d'« importer » ces développements dans les systèmes de production pour en augmenter les capacités, par exemple en s'affranchissant des frontières physiques du système. Ce sont ces nouvelles technologies qui sont considérées comme étant à l'origine d'une nouvelle révolution industrielle.

2. L'industrie 4.0 et les systèmes cyber-physiques

Le développement des TIC continue à non seulement renforcer l'omniprésence de l'informatique et de l'automatisation dans la gestion de la production, mais elle a également mené à l'émergence de nouvelles technologies et principes. Si certains auteurs dans la communauté scientifique considèrent qu'il s'agit d'un prolongement des modifications apportées par la troisième révolution industrielle, d'autres soutiennent que ces nouvelles technologies et principes sont au cœur d'une nouvelle révolution industrielle. Quel que soit le point de vue à ce sujet, le développement de ces nouvelles technologies est considéré comme stratégique pour l'industrie. Plusieurs initiatives ont donc vu le jour à travers le monde pour en promouvoir le développement. Pour désigner cette 4^{ème} révolution industrielle, plusieurs termes sont adoptés (Abir et al. 2019 ; Julien and Martin 2021) : « Industrie 4.0 » pour l'Allemagne, « Industrie du futur » pour la France, « Industrial Internet » pour les États Unis d'Amérique et « Made-in-China 2025 » en Chine. Ces termes ne sont pas tous porteurs du même sens. Émanant d'initiatives régionales, ces programmes sont en effet soumis aux doctrines industrielles locales (Müller and Voigt 2018 ; Abir et al. 2019). Cependant, un certain nombre d'éléments clefs restent les mêmes, car ces initiatives partagent la même origine qui est le programme Allemand. De ce fait, dans la suite de ce manuscrit nous n'emploierons qu'un seul terme

pour désigner l'initiative globale, à savoir l'Industrie 4.0, tout en cherchant à ne pas privilégier une doctrine spécifique. Les technologies clefs

Plusieurs technologies clefs issues des TIC forment le socle de l'industrie 4.0 et sont reprises dans de nombreux travaux. Julien and Martin (2021) proposent une présentation exhaustive et détaillée des technologies impliquées dans l'industrie 4.0 dans leur ouvrage. Vaidya et al. (2018) présentent ces technologies sous la forme de neuf « piliers » considérés comme clefs dans le développement de l'industrie 4.0.

- 1) Le « Big Data and Analytics » concerne les nouvelles méthodes de collecte, de traitement et d'analyse des données. Il s'agit à la fois de modèles et d'algorithmes permettant de gérer des données en prenant en compte quatre dimensions : le volume, la diversité, le débit de génération et de traitement, ainsi que la véracité/fidélité des données (Han et al. 2015). Ce domaine touche à une activité où l'opérateur humain avait jusqu'à présent préséance, à savoir l'analyse et la compréhension de l'état du système. A la différence d'un opérateur humain, cette analyse est appliquée à une échelle plus globale et permet d'intégrer un volume de données vaste et varié. Ces développements représentent une avancée conséquente, car le volume d'informations gérables simultanément par un opérateur humain reste très limité en comparaison. C'est par ailleurs la raison même pour laquelle les informations fournies à un opérateur sont généralement un agrégat qualitatif de données issu d'un pré-traitement par le système d'information. Grâce à ces développements, il est ainsi possible de prendre en compte plus de critères lors de l'analyse et donc potentiellement de fournir à l'opérateur humain un support plus précis.
- 2) Le terme « Robots autonomes » est explicite : les robots industriels tendent à ne plus être liés par des plans de production stricts, mais au contraire à évoluer en permanence afin de s'adapter au contexte. En réalité, suivant les implémentations de ce principe, les robots ne sont pas les seuls à gagner en autonomie. En effet, c'est généralement par la communication entre divers acteurs capables de décision que l'autonomie se développe. Nous pouvons prendre pour exemple les architectures Holoniques (Van Brussel et al. 1998; Leitão and Restivo 2006; Barbosa et al. 2015; Valckenaers 2019) qui tendent à représenter les acteurs du système comme des agents génériques pouvant remplir une ou plusieurs tâches. Cela va de la simple flexibilité vis-à-vis

d'une tâche, à des mécanismes plus complexes de coopération avec d'autres acteurs, humains ou artificiels. Ainsi, les robots sont désormais capables de négocier le plan d'action en fonction des compétences de chacun et de contraintes, dans le but d'atteindre des niveaux de performance satisfaisants en toutes circonstances. L'emphase est ici à mettre sur l'adaptabilité et l'aspect dynamique, car de nombreux algorithmes d'optimisation statique existent déjà et sont utilisés pour l'optimisation de la production.

- 3) La simulation n'est pas une nouvelle technologie, mais l'augmentation de la capacité de traitement des TIC et les travaux sur la modélisation des systèmes physiques permettent maintenant d'obtenir des simulations qui sont à la fois précises et rapides. Auparavant, la simulation était coûteuse et réservée principalement à la conception et la planification, mais actuellement il devient envisageable de l'exploiter jusqu'en production afin d'anticiper le comportement des systèmes. De plus, la simulation a mené à de nouveaux principes tels que le « digital commissioning » où il est question de tester plusieurs configurations possibles sur un simulateur afin d'identifier la meilleure solution avant de l'implémenter sur le système réel. La simulation et les technologies qui en découlent sont étroitement liées à la modélisation du système et à une autre technologie : les « jumeaux numériques » (Grieves and Vickers 2017; Madni et al. 2019). Il s'agit en effet d'un modèle numérique complet du système physique possédant les mêmes caractéristiques et dont l'état est étroitement lié au système physique (Kritzinger et al. 2018). Ainsi, une simulation peut être considérée comme une instance de jumeaux numériques dont le lien avec le système est rompu afin d'expérimenter de nouveaux paramètres. La simulation devient donc un support pour une majeure partie des activités du système de production, permettant d'anticiper l'état du système, mais aussi de préparer toute intervention dans le but de minimiser les perturbations.
- 4) L'intégration verticale et horizontale du système vise l'abolition des frontières à la fois au sein du système de production mais également entre le système et son environnement. Si cela peut paraître logique d'interconnecter tous les paramètres susceptibles d'influencer un système quand on recherche son optimisation, cela pose de nombreux problèmes. D'une part, l'interconnexion requière une infrastructure complexe pour la communication avec tous les acteurs, mais également une plus grande

capacité de traitement pour gérer le volume d'informations générées. D'autre part, il est également nécessaire de réfléchir au format des données pour permettre l'interopérabilité entre ces nombreux éléments hétérogènes.

- 5) L'Internet des Objets Industriels (IIoT) répond à la problématique d'interconnectivité au sein du système. Ce principe permet le déploiement de nœuds autonomes distants sans pour autant les isoler du réseau. Il est ainsi possible de placer les capteurs et actionneurs au plus près du système et avec une plus grande densité qu'auparavant. L'IIoT permet donc de maintenir un contact permanent avec les entités mobiles du système (opérateurs, véhicules, ...) ainsi que les ressources (machines, produits, ...) (Manavalan and Jayakrishna 2019).
- 6) La Cyber sécurité et les Systèmes Cyber-Physiques (CPS) jouent un rôle important dans l'industrie 4.0, notamment vis-à-vis des autres technologies. Plutôt qu'une technologie, la cyber-sécurité correspond à un domaine large qui cherche à architecturer les systèmes et à protéger les technologies de l'industrie 4.0 et les systèmes (Ervural and Ervural 2018), pouvant menacer l'humain par leurs interactions de plus en plus étroites. Ces menaces touchent tous les systèmes bénéficiant des TIC et sont plus dangereuses à mesure que les systèmes gagnent en connectivité et fonctionnalité (augmentation des vecteurs d'intrusion). Il s'agit donc d'un sujet d'importance pour une révolution basée dans sa quasi-totalité sur les TIC. Cependant la cybersécurité n'a pas d'incidence directe sur les objectifs de l'industrie 4.0. Quant au CPS, il s'agit d'une vision globale sur laquelle se basent et au sein de laquelle s'intègrent la plupart des technologies de l'industrie 4.0. Les CPS sont définis comme « *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* » (Monostori 2014). Le principe des CPS est déjà déployé dans de nombreux sites de production et ce, grâce à l'introduction de l'informatique dans de nombreux domaines. Ce pilier constitue ainsi plus un cumul des travaux réalisés depuis l'introduction de l'informatique dans l'industrie qu'une brusque évolution.
- 7) Les technologies dites du « Cloud » permettent de mettre en place un espace numérique commun où chaque ressource est accessible sans nécessiter un

accès physique. Ces technologies complètent le niveau cyber des CPS. Cela permet non seulement la mobilité des acteurs qui peuvent opérer hors-site au besoin, mais également un accès et une vue à plus grande échelle de la production. Il devient en effet possible de coopérer avec d'autres acteurs distants (fournisseurs, autres usines, ...) en partageant des données voire en intervenant à distance.

- 8) La production par ajout de matière, aussi connue sous le nom d'impression 3D, permet une approche plus efficace de la production car elle se contente d'ajouter le minimum de matière nécessaire à une pièce. En effet la plupart des activités mécaniques retirent de la matière d'une pièce principale (extrusion) et/ou emploient de nombreux sous-composants afin de fournir un produit final. L'impression 3D évite le gaspillage de ressources et permet la réalisation de pièces très différentes sur une même machine. Néanmoins, celle-ci nécessite une surveillance soutenue de la gestion des produits et des données liées et son coût environnemental reste encore très élevé.
- 9) La réalité augmentée est une technologie dont bénéficie directement l'opérateur humain. Le système est en mesure à la fois de percevoir ce qui entre dans le champ de vision de l'opérateur et de lui retourner des informations contextuelles sans avoir à manipuler un terminal. Ce système a non seulement un impact potentiel sur les compétences de l'opérateur, mais permet aussi d'accentuer l'intégration de l'opérateur dans le système.

Les systèmes cyber-physiques sont ici présentés comme un concept intégrateur, une vision architecturale où s'articulent différentes technologies de l'industrie 4.0. C'est donc de notre point de vue un des piliers supportant le développement de l'industrie 4.0. Les CPS revêtent ainsi un aspect important et constituent la colonne vertébrale de l'industrie 4.0. En effet, si l'on se base sur l'architecture RAMI 4.0 utilisée pour classifier de nombreux développements de l'industrie 4.0, le principe de systèmes cyber-physiques peut être considéré comme le liant faisant le lien entre tous les aspects du système. Cela donne naissance à une notion plus spécifique : les CPS industriels. Selon Cardin et al. (2021), « Les systèmes industriels cyber-physiques consistent en des éléments physiques dotés de leurs systèmes de pilotage, offrant et consommant des services tout au long d'une chaîne de valeur, intégrés à des systèmes numériques disposant de moyens d'analyse et de reconfiguration en ligne de ces éléments. Ces éléments présentent divers degrés d'autonomie, se connectent et coopèrent entre eux et avec l'homme en fonction de la

situation, via des systèmes d'information, afin d'améliorer les actions et les processus décisionnels en temps réel, réagir à des conditions imprévues et faciliter l'intégration des évolutions du système industriel dans le temps. ». La figure 2 issue du même ouvrage fournit une représentation de cette définition et montre son importance dans la gestion d'un système. Le concept de CPS industriel ne se limite pas à un domaine particulier, mais au contraire fédère de nombreux secteurs dits « industriels », tels que la production, le transport, ou encore les systèmes de santé sans s'y limiter.

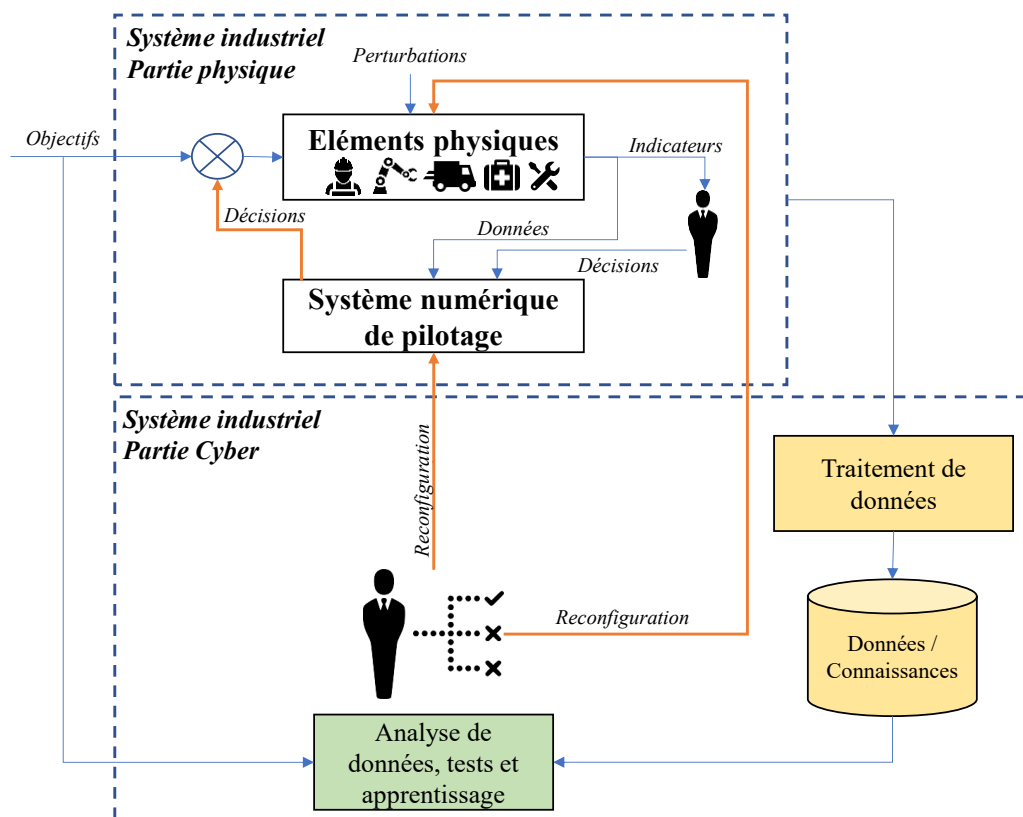


Figure 2 Représentation d'un système Cyber-Physique industriel (Cardin et al. 2021)

2.2 Synergies entre piliers technologiques et champs d'application

Les piliers technologiques introduits précédemment sont en constante interaction au sein des CPS ce qui fait de ces derniers un élément central. Dans notre cas, à savoir les systèmes de production, il est possible d'être plus précis en employant le terme « Système de Production Cyber-Physique » (CPPS) comme étant des CPS industriels spécifiquement dédiés à la production, définis comme « *consist of autonomous and cooperative elements and sub-systems that are getting into connection with each other in situation dependent ways, on and across all levels of production, from processes through machines up to*

production and logistics networks » (Monostori 2014). Cette organisation permet de lier virtuellement tous les éléments du système de production et potentiellement de les faire collaborer entre eux.

Ces piliers technologiques représentent eux-mêmes un noyau dur sur lequel reposent de nombreux développements. Prenons l'exemple des architectures de contrôle des systèmes manufacturiers. En exploitant le volume d'informations disponibles et la finesse de contrôle offerte par les CPPS, ces architectures de contrôle cherchent à être plus dynamiques et flexibles. Ces architectures font que les systèmes de production tendent à gagner en autonomie afin de s'adapter aux aléas qui peuvent survenir. Parmi ces systèmes, nous pouvons citer par exemple l'architecture ADACOR (Leitão and Restivo 2006) qui s'appuie sur le paradigme holonique. Ce type d'architecture est à la fois hiérarchisé et distribué et va tendre à représenter les relations réelles entre les différents composants d'un système. Ce type d'architecture semble également pouvoir inclure l'opérateur humain sous la forme d'un holon qui interagirait avec les autres holons du système, bien que cela soulève d'autres problèmes d'interaction (Sparrow et al. 2021). Un état de l'art sur les liens entre architectures holoniques, CPS et industrie 4.0 a été réalisé (Derigent et al. 2020). Il est montré que ces trois concepts offrent une réelle synergie et complémentarité lors de la conception de ce que l'on peut appeler « les systèmes de production du futur ».

D'autres travaux se focalisent sur les interactions au sein même de ces architectures de contrôle, en exploitant par exemple le principe des appels d'offre (contract-net) (Smith 1980) ou les champs de potentiel (Ge and Cui 2002; Pach et al. 2014). Dans le principe des appels d'offre, un agent lance un appel auquel plusieurs agents en relation répondent, suivi du choix, par l'émetteur, de l'offre la plus intéressante en fonction de ses critères. Le demandeur peut potentiellement comparer plus de critères, mais cette architecture est sensible à la latence des réponses, certaines offres arrivant trop tard. Le principe de champs de potentiel se base, quant à lui, sur l'émission en continu d'un champ (modélisant une offre ou une demande de service) pour chaque tâche réalisable, centré sur l'acteur réalisant la tâche. Ce champ varie dynamiquement en fonction de plusieurs critères (disponibilité, ...) et décroît avec la distance, permettant de choisir une offre adaptée sans diffuser de demande. Cette méthode permet un comportement très dynamique voire opportuniste mais a pour inconvénient un degré de contrôle plus faible. Cela implique une plus grande complexité lorsque l'intervention d'un tiers humain devient souhaitable.

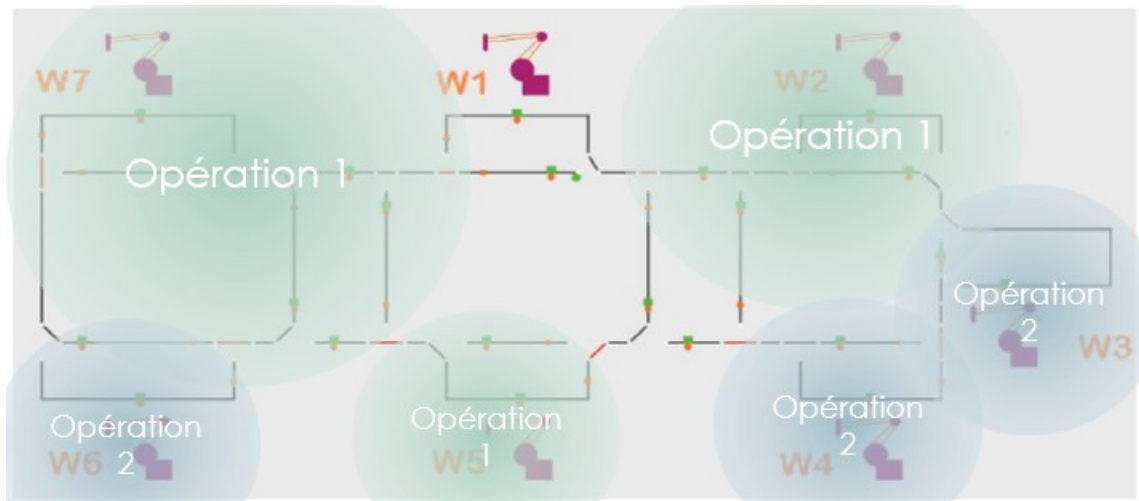


Figure 3 Illustration du principe de champ de potentiel sur une cellule de production 2D ; les machines W2 et W7 sont plus productives que W5 et émettent donc un champ plus fort

Des synergies sont également observables avec certaines technologies, comme avec la simulation. Un des axes principaux de développement autour du principe de simulation est le « Virtual Commissioning » (Berger et al. 2015). Ce principe permet à un opérateur de tester et valider une modification sans pour autant manipuler le système existant. Ce principe bénéficie fortement des « jumeaux numériques » (Grieves and Vickers 2017), présentés précédemment (cf. chapitre 2.2.1). Le comportement lors de la simulation est donc le même que celui du système réel et la solution étudiée lors de la simulation peut être appliquée immédiatement au système final une fois validée. Les architectures de contrôle peuvent également en bénéficier avant d'appliquer une commande. Un autre emploi, plus simple, consiste à réaliser une projection de l'état du système dans un futur proche. Outre le fait de pouvoir surveiller les dérives, cette utilisation permet de détecter les possibles erreurs, par exemple la violation d'une contrainte, avant que l'incident n'ait lieu. Il est alors possible de planifier une correction, par exemple avec le « Virtual Commissioning », sans précipitation. On peut donc observer une synergie entre le principe de simulation et les systèmes autonomes, cependant le rôle de l'humain reste encore à spécifier.

3. La notion d'intelligence appliquée au contrôle

De nombreux auteurs se sont attachés à étudier le concept d'intelligence appliqué au contrôle dans un contexte Industrie 4.0 (voir notamment : Ross et al. (2013), Pacaux-Lemoine et al. (2017), Moustafa et al. (2018), Bordeleau et al. (2018), Lee et al. (2018)). L'emploi de ce terme pose plusieurs problèmes car la notion d'intelligence est aussi floue que son emploi est commun. Par exemple, une définition très restrictive de cette notion est basée sur une traduction littérale de l'anglais, et associe intelligence à la capacité d'informer ou d'obtenir de l'information. L'emploi le plus commun concerne l'activité cognitive avancée qui est sensée différencier l'être humain des autres êtres vivants. Il est cependant difficile de caractériser cette différence alors que les connaissances dans le domaine de la cognition animale sont limitées. En effet, il a été observé que certains animaux étaient en mesure d'identifier un outil permettant d'assouvir un besoin puis de s'en servir (Sanz et al. 2013). Cet acte est parfois considéré comme une preuve d'intelligence, ce qui pousserait à penser que la notion d'intelligence est liée au processus de réflexion qui permet à un être de définir la marche à suivre entre un état souhaité et un état initial. C'est cette explication que semble privilégier Yao et al. (2017) dans leur définition d'un système manufacturier intelligent. Ainsi, ceux-ci déclarent que « *intelligent manufacturing (IM) can be viewed as the intersection of AI and manufacturing* ». Kusiak (2018) souligne également l'importance de la notion d'intelligence dans les systèmes manufacturiers ainsi que dans les technologies afférentes. L'intelligence artificielle (IA) permet, après un apprentissage, d'analyser une situation grâce aux informations à disposition et donc de prendre des décisions permettant de lier une situation à l'état souhaité du système. En cela, le terme « intelligence artificielle » semble bien choisi et permet d'atteindre une certaine intelligence dans le contrôle de la production. Cependant, au même titre qu'un humain, la qualité de l'apprentissage impacte fortement les résultats de l'IA et donc le niveau d'intelligence reconnu.

La publication de Yao et al. souligne une transition vers un nouveau type de « smart manufacturing ». Cette notion est étudiée par Kusiak (2018). Le pendant francophone pour ce terme serait la « production maligne », du mot malin (au sens de rusé). Cependant le mot « malin » peut sembler inadapté en français. Une autre définition de l'intelligence, tombée en désuétude à notre époque, peut correspondre au terme anglais de « smart ». Il est possible de parler d'intelligence entre deux entités, suivant la définition « *Correspondance, communication entre des personnes qui s'entendent l'une avec*

l'autre » (Académie française, 8^e édition), où « l'entente » est synonyme de connivence. Il est possible de retrouver cette utilisation du terme dans la notion d'intelligence économique ou encore des services d'intelligence (espionnage et contre-espionnage). Cette « connivence » peut passer à la fois par l'échange d'informations et par la réalisation d'actions et amène petit à petit à intégrer le concept de coopération entre entités humaines et artificielles. Cette transition vers un autre niveau d'intelligence est reprise par l'industrie 4.0, car il n'est pas seulement question d'employer l'IA, mais aussi de mettre en interaction tous les secteurs d'activité du système global entre eux (Intégration Verticale) ainsi que les acteurs extérieurs (Intégration Horizontale) et de les rendre à même d'échanger et de coopérer (systèmes autonomes, Big Data).

Ce changement dans le niveau d'intelligence est un élément très important. En effet, l'IA a ses limites et le consensus est qu'elle n'égale en rien l'intelligence humaine en l'état actuel. La notion « IA faible » est d'ailleurs employée pour caractériser les IA qui sont développées pour une tâche spécifique, en opposition à l'IA forte encore inexistante, qui s'approcherait de la cognition humaine en termes de polyvalence. De ce fait, bien que l'IA faible puisse réaliser quelques tâches qui étaient auparavant du domaine de l'humain, les applications de l'IA restent limitées à ce jour et l'impact exacte de cette technologie dans l'industrie n'est pas encore clairement prouvé, au-delà de l'industrie du « tout numérique » (internet, etc.). Cependant, avec cette nouvelle étape dans l'intelligence du système et le développement du concept de « smart manufacturing », il est maintenant possible pour le système de prendre des décisions et donc d'appliquer des plans d'action plus efficaces, ainsi que de nouvelles fonctions, notamment dans la gestion du système de production. Un des aspects particulièrement explorés est celui qui consiste à élargir le champ décisionnel au-delà des critères usuels (ex : coûts, délais, qualité (Maskel 1989)) par une prise en compte de nouvelles exigences sociétales et environnementales. Dans leurs travaux, Lee et al. (2018) soulignent l'importance de l'intégration de l'IA avec les autres technologies du système en déclarant « *Integration of AI with recent emerging technologies [...] will enable operation of industries in a flexible, efficient, and green way* ».

Les systèmes multi-agents (Weiss 1999; Monostori et al. 2006; Ferber) offrent des éléments de réponse pertinents pour accompagner le développement du « smart manufacturing » (Leitão 2009). Le principe est de distribuer l'intelligence dans le système afin de permettre la coopération et donc l'intelligence entre les acteurs de la production. Il reste cependant à articuler et intégrer l'ensemble, ceci pouvant être réalisé grâce au

développement d'une vision holonique lors de la conception de l'architecture globale de contrôle. Le rôle de l'humain en interaction avec des agents artificiels reste lui aussi à déterminer, car les agents « logiciels » sont généralement en interaction constante pour des temps de réponse très courts, ce qui a tendance à exclure l'humain de ces échanges.

Comme introduit précédemment, les architectures holoniques (Van Brussel et al. 1998; Barbosa et al. 2015) conduisent à définir l'architecture d'un CPPS au travers du concept d'holons, élément récursif étant à la fois un tout et une partie, permettant ainsi de définir différents niveaux de décisions, où chaque holon dispose d'une partie physique et d'une partie numérique. Selon cette approche, un Holon est capable de prendre des décisions et de coopérer avec les autres Holons dans le but d'atteindre ses objectifs et/ou les objectifs globaux du système (Derigent et al. 2020). Cette coopération passe par un système d'échange et de négociation entre Holons, où chacun tend à exprimer ses besoins et en quoi il peut contribuer aux autres Holons en termes de compétences.

Les Holons peuvent être organisés suivant une hiérarchie pyramidale (Leitão and Restivo 2006), ou encore ne pas avoir de hiérarchie établie. En cela les architectures HOLONIQUES peuvent ressembler aux différentes hiérarchies que l'on peut retrouver dans l'activité humaine. Pour finir, comme introduit précédemment, chaque Holon possède un pendant physique qu'il est censé représenter. S'il s'agit là des caractéristiques originales accordées aux Holons, les travaux de Van Brussel et al. (1998) ont apporté une nouvelle subdivision largement reprise dans le monde de la recherche ; elle distingue quatre types de holon :

- Les Holons « Product », qui sont chargés de gérer le savoir portant sur la production.
- Les Holons « Resource », qui gèrent le savoir portant sur le processus.
- Les Holons « Order », qui sont responsables de l'exécution du processus.
- Les Holons « Staff », qui agissent comme conseillers ou médiateurs pour l'architecture.

Cette dichotomie des Holons représente une des bases majeures dans le développement des architectures holoniques, grâce notamment à sa genericité. Selon les travaux de Mathews (1996), l'organisation holonique de l'activité tend à être également observée en dehors des systèmes informatisés, dans la nature, ce qui tend à démontrer la viabilité d'une telle organisation. De fait, cette organisation n'est pas complètement étrangère à celle observée dans les systèmes où l'opérateur humain opère comme acteur principal. Dans l'architecture ADACOR² par exemple (Barbosa et al. 2015), la hiérarchie des

Holons peut changer en fonction des besoins, au même titre qu'un opérateur humain peut prendre la décision d'assister un autre opérateur si le besoin s'en fait sentir.

Un des aspects soutenus par ce type d'approche, qu'il s'agisse d'opérateur humain ou d'entités artificielles (agent ou holon), est la réactivité et l'adaptabilité face aux évolutions brusques des conditions, comme lors d'un incident. Ces caractéristiques dépendent d'une optimisation dynamique, qui est devenue souhaitable face aux méthodes d'optimisation statique utilisées jusqu'à présent. Effectivement, bien qu'elles fournissent de bons résultats, ces méthodes sont incapables de fonctionner en temps réel face aux perturbations, voire même simplement de prendre en considération les défaillances du système.

4. La place de l'humain dans le contrôle de systèmes de production

Il existe un certain nombre de rapports d'incidents et de recherches pointant du doigt des défauts liés à l'automatisation excessive ou inadaptée des systèmes (Endsley 1995a; Lee and See 2004).

Prenons en premier un cas d'école, celui de la centrale nucléaire de Three Miles Island (1979). Bien que les causes de l'incident soient nombreuses (cf. Reason 1990 pour une analyse détaillée), comme souvent lors d'incidents majeurs, un des déclencheurs mis en cause est lié à l'automatisation du système. En effet, un des indicateurs fournis aux opérateurs humains correspondait à l'émission d'une commande et non à son exécution, en l'occurrence l'ouverture ou la fermeture d'une valve. Ainsi, les opérateurs faisant confiance au système n'ont compris que tardivement que la valve était restée coincée ; ce qui a, par conséquent, complexifié la compréhension de la situation. Il s'agit à la fois d'une erreur de conception du système qui a envoyé un signal ambigu et d'un problème de « conscience de la situation » chez les opérateurs.

Tout opérateur humain travaille à l'aide d'un modèle mental du système (Moray 1998), sur lequel repose sa conscience de la situation. Endsley définit la conscience de la situation comme comportant trois niveaux « *i) the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, ii) the comprehension of their meaning, and iii) the projection of their status in the near future* » (Endsley 1995b). Dans ce sens, le signal n'était pas adapté au modèle qu'a construit l'opérateur humain, ce qui a conduit

à une mauvaise compréhension de la situation et à un conflit entre l'état attendu par les opérateurs et l'état observé.

La sur-confiance en l'automatisation déployée a également pu jouer un rôle dans la situation, car les opérateurs n'ont pas remis en question le système. Bainbridge parle de l'ironie de l'automatisation (Bainbridge 1983) pour exprimer le fait qu'on souhaite éviter les erreurs humaines en automatisant un système mais qu'on laisse le soin aux opérateurs humains de gérer les situations complexes et inattendues que les automatismes ne peuvent pas traiter. Il est donc important de prendre en compte le facteur humain dans le développement des nouveaux systèmes de contrôle, sous peine de s'exposer à des incidents ou à des accidents. Ce problème est également pointé du doigt par Endsley and Kiris (1995) qui parlent « d'opérateurs en dehors de la boucle », pour désigner le fait que certains opérateurs se trouvent en dehors de la chaîne décisionnelle du système. Plus récemment, Trentesaux and Millot (2016) ont traité cette problématique en soulignant les points clef du problème et en promouvant une approche centrée sur l'humain. L'approche proposée vise à contrer le paradoxe souligné par Bainbridge, pour lequel ils emploient le terme « humain magique » ; cette reformulation permet de souligner la considération candide selon laquelle l'opérateur serait toujours en mesure de fournir une solution adaptée et de l'appliquer.

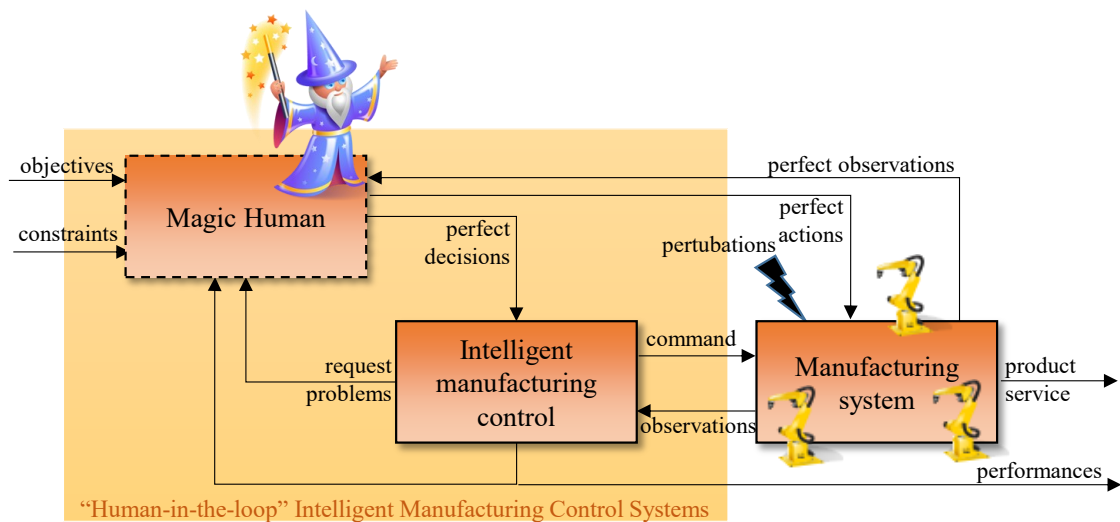


Figure 4 L'Humain Magique : comment l'humain est vu par l'automaticien

Les technologies de l'industrie 4.0 apportent de nombreuses opportunités pour rétablir un rôle et une intégration efficace de l'opérateur humain. Il y a d'une part des technologies permettant de réduire la fracture entre le CPPS et l'opérateur humain : les vêtements intelligents permettent une interaction directe entre l'opérateur et le système pour un

travail en proximité. Les cobots, ou robots collaboratifs, permettent notamment à un opérateur humain de coopérer en toute sécurité et de bénéficier d'une assistance dans la réalisation de tâches. A cela s'ajoutent les divers appareils de communication tels que les tablettes qui permettent à un opérateur de rester en contact avec le système à tout instant, ou encore les systèmes de réalité augmentée qui permettent de superposer la perception de l'opérateur humain à celle du système. Bien évidemment, le développement de cette offre technologique ne suffit pas à assurer une conscience de la situation satisfaisante ; c'est une condition nécessaire mais aucunement suffisante si toute la dimension humaine n'est pas prise en compte lors du développement des applications.

Certaines technologies ont par ailleurs pour ambition d'augmenter les capacités de l'opérateur humain. Citons par exemple les exosquelettes qui lui permettent de réaliser des tâches jusque-là physiquement impossibles ou astreignantes, tout en préservant sa santé. La réalité augmentée permet également à l'opérateur d'accéder à des informations pendant la réalisation de tâches, lui facilitant l'exécution de l'intervention pour laquelle il a peu d'expérience. Il s'agit à la fois de supports physiques mais également cognitifs pour les opérateurs.

A ce titre, Romero et al. (2016) identifient huit combinaisons spécifiques humain-technologie qui pourraient former à terme les bases d'un opérateur dit 4.0. L'opérateur combiné avec un exosquelette devient un opérateur à la force décuplée, pouvant manipuler aisément et en sécurité des charges lourdes ; il s'agit d'un équilibre entre la flexibilité de l'opérateur et l'efficacité d'un système automatisé. L'opérateur combiné à la réalité augmentée produit un opérateur augmenté, disposant d'informations supplémentaires sur son environnement et pouvant être assisté d'un point de vue cognitif par le système. L'opérateur combiné à la réalité virtuelle produit un opérateur virtuel, pouvant interagir avec une copie fictive du système à des fins d'entraînement ou de prise de décision. Le niveau de réalisme offert par la réalité virtuelle permet à l'opérateur de s'immerger dans la situation et donc améliore la compréhension qu'en a l'opérateur. L'opérateur combiné aux appareils de suivis de l'activité (cardiogramme, ...) devient un opérateur sain, grâce à la possibilité de détecter et de gérer le stress subit par l'opérateur. Il est donc possible de gérer proactivement les activités pour maintenir le bien-être de l'opérateur et ainsi augmenter son efficacité. L'opérateur combiné à un assistant personnel intelligent devient un « opérateur intelligents » (accent mis sur la coopération) capables notamment de réaliser plusieurs tâches complexes simultanément en s'appuyant sur l'assistant et sa capacité d'interfaçage avec le système. L'opérateur peut par exemple

demander verbalement la recherche d'une information précise sans interrompre une tâche manuelle. L'opérateur combiné à un robot collaboratif devient un opérateur collaboratif, capable de participer aux opérations des robots en toute sécurité. Il n'est alors plus nécessaire de séparer les robots des opérateurs par des barrières de sécurité, facilitant d'autant l'intervention des opérateurs sur le système. L'opérateur combiné aux réseaux sociaux devient un « opérateur social » (accent mis sur l'interaction sociale), capable de se connecter aux acteurs ayant l'information et le savoir-faire pour répondre à ses besoins. L'opérateur n'est plus tributaire de son cercle de connaissances, car il peut alors communiquer globalement son besoin et tous ceux pouvant l'aider sont libres d'intervenir. Il n'est pas impossible que le système intervienne également en fournissant des informations pertinentes en fonction du type de demande, par exemple pour de la prise de décision. La huitième et dernière combinaison concerne l'opérateur et l'analyse du « big data » et aboutit à des opérateurs « analytiques », capables de mieux comprendre et d'anticiper le comportement du système. De tels opérateurs pourraient intervenir de façon préventive sur le système avant qu'une avarie ne se déclare et pourraient ajuster au mieux la production vis-à-vis des objectifs. Ces combinaisons impliquent à la fois des interactions physiques et des interactions cognitives, offrant à l'opérateur la possibilité de s'adapter à de nombreuses tâches différentes. Dans ces mêmes travaux, Romero et al. abordent la relation entre l'opérateur augmenté et le système dans le but d'intégrer l'opérateur avec succès. Ils présentent, pour ce faire, un « Adaptive Automation Control Systems » s'appuyant sur trois stratégies visant l'adaptation des tâches et leur allocation. La première s'appuie sur les événements critiques qui « déclenchent le partage ou l'échange du contrôle entre les agents humain-machine dans le but de garantir l'accomplissement d'une tâche critique par un agent humain, machine, hybride ou encore émergent, ou lorsque le comportement d'un agent remet en cause le bon fonctionnement du système ». La deuxième stratégie est basée sur les mesures, « car les agents humain et machine sont continuellement surveillés dans le but de détecter les déviations vis-à-vis de leur tâche ou des performances idéales, afin de déclencher les contremesures adaptées ». La troisième stratégie est basée sur les modèles, notamment le modèle cognitif humain et les modèles des machines dans le but d'atteindre une distribution de la charge de travail efficace et efficiente.

Le travail original mené autour du développement d'architectures de contrôle holoniques devant s'interfacer avec l'humain proposé par Sparrow et al. (2019, 2021) est à souligner. Jusqu'alors, les architectures holoniques ne prenaient que peu ou pas en compte les

possibles interventions humaines et les contraintes inhérentes à ces interventions. Les contraintes au sein d'une architecture Holonique, notamment de temps et de complexité dues aux nombreuses interactions entre holons, rendent délicates l'interaction entre un humain et un holon artificiel (au même titre qu'avec un « agent »). L'architecture présentée dans les travaux de Sparrow et al. (Ibid.) proposant la création d'un modèle de holon humain lié à un jumeau numérique de l'opérateur permet de pallier ces difficultés et représente une contribution originale dans l'intégration de l'humain au sein de l'industrie 4.0 qui complète, de notre point de vue, notre propre contribution présentée dans les chapitres suivants.

5. Conclusion

Ce chapitre avait pour ambition de cerner les éléments clefs de notre réflexion et positionner le contexte scientifique de nos travaux par rapport à un certain nombre d'enjeux. Les technologies qui relèvent de l'industrie 4.0 et les architectures de contrôle conçues pour ce nouveau type d'industrie disposent d'un important potentiel d'intégration de l'opérateur humain. Cependant, de notre point de vue, ces technologies et architectures semblent paradoxalement pousser à l'exclusion de l'opérateur humain ou conduisent au risque d'une mauvaise intégration de celui-ci, rendant ainsi difficile la gestion de l'imprévu ou de la complexité des systèmes de production.

Nous estimons que la prise en compte de l'humain au sein de l'industrie doit évoluer au même titre que l'offre technologique évolue. Le chapitre suivant ambitionne ainsi d'étudier plus précisément les principales méthodes de conception de systèmes intégrant l'opérateur humain ; nous analyserons ces contributions selon leur capacité à tenir compte des évolutions technologiques. Cette étude de la littérature nous permettra de justifier notre approche de conception.

CHAPITRE 2 : MODELES DE CONCEPTION INTEGRANT L'HUMAIN : ETAT DE L'ART

Le premier chapitre a montré l'importance de l'humain au sein du système et démontré les besoins et les risques lors de son intégration au sein des futurs systèmes de l'industrie 4.0. Il a également mis en évidence qu'il ne s'agit pas simplement de confier plus de tâches aux opérateurs, mais de concevoir un système dans lequel il leur est possible de s'intégrer et d'évoluer. L'intégration et l'évolution doivent se faire en fonction de deux critères principaux. D'une part les besoins et leurs compétences pour faire face à la complexité induite par l'évolution technologique et l'attente sociétale. D'une autre part l'accroissement de l'autonomie des entités artificielles qui évoluent au sein des systèmes industriels cyber-physiques. Ce chapitre étudie deux grandes méthodes traitant de cette conception : d'une part l'ingénierie système développée dans le cadre des systèmes socio-techniques et d'autre part, la conception dite centrée sur l'utilisateur.

Ces deux méthodes sont questionnées sur leur pertinence à répondre à notre objectif d'une démarche de conception prenant en compte l'humain dans les futurs systèmes industriels (parties 1 et 2). La troisième partie aborde les principaux modèles de conception orientés sur l'humain. La quatrième et dernière partie justifie et détaille la méthode retenue dans le cadre de nos travaux et pose notre hypothèse de travail.

1. L'ingénierie système

L'ingénierie système (IS) propose, à la base, une vision technologique où cohabite la prise en compte des exigences fonctionnelles des systèmes et la volonté de considérer les utilisateurs et clients de ces systèmes. L'IS est définie comme: « a transdisciplinary and integrative approach to enable the successful realization, use, and retirement of engineered systems, using systems principles and concepts, and scientific, technological, and management methods » (INCOSE, 2019). L'ingénierie système traite indifféremment

les acteurs humains et les entités artificielles dans leur définition d'un système. Ainsi un système est « *an arrangement of parts or elements that together exhibit behaviour or meaning that the individual constituents do not* ». La définition ne fournit en effet aucune précision sur la nature artificielle ou non des composants. Il s'agit uniquement de ressources qui participent à l'accomplissement des objectifs du système. En cela, chaque ressource participe à l'accomplissement de fonctions et sous-fonctions, menant à l'achèvement d'une fonction plus globale répondant à un objectif. La conception d'un système s'articule donc autour de ces fonctions et de leur mise en œuvre au travers d'activités (ISO 15288) et de processus (ISO 9000:2000) pour lesquels des analyses peuvent être menées pour garantir un ensemble de performances décrites en termes de disponibilité, de fiabilité, de maintenabilité, etc.

Lors de l'analyse d'un système, chacune des fonctions réalisant directement l'objectif du système est immédiatement identifiée. Il existe à ce stade peu de différences entre l'objectif du système et les fonctions à réaliser. Cependant chaque fonction peut également être tout ou partie d'autres fonctions, de façon à ce que des objectifs intermédiaires puissent être établis pour le système. Cette décomposition fonctionnelle du système étudié, où chaque fonction fait partie d'une « hiérarchie » de fonctions, est une étape essentielle de l'ingénierie des systèmes.

Il existe plusieurs approches pour concevoir le système à partir de cette décomposition fonctionnelle : séquentielles, itératives, concurrentes, multidisciplinaire ... Celles-ci ont évolué dans le but d'être plus performantes ou d'offrir d'autres avantages, mais l'objectif principal reste le même. Il s'agit de trouver comment réaliser chaque fonction jusqu'à atteindre l'objectif du système, tout en respectant les attentes du client (besoins, contraintes...). Des développements plus récents ont également amené des contributions, visant à intégrer les retours des utilisateurs et du client pendant la conception. L'objectif est de limiter les erreurs de conception en corrigeant les problèmes relevés avant la finalisation du système. Cependant, même avec l'introduction de retours de la part des utilisateurs, ces méthodes montrent certaines limites.

En effet, malgré la prise en compte des retours des utilisateurs, les concepteurs privilégient en général les besoins fonctionnels. Cet état de fait est observable dans le cadre de l'automatisation massive de l'industrie, pour lequel Bainbridge (1983) souligne le fait que de nombreux concepteurs voient (à tort) l'automatisation comme un moyen de se prémunir des erreurs des utilisateurs. L'automatisation est, dans ce contexte, souvent perçue comme plus efficace et moins coûteuse que la main d'œuvre humaine, ce qui

conduit à concevoir des processus hautement automatisés. Plus récemment, de nombreuses technologies innovantes ont été introduites dans les usines alors que l'état de la recherche ne permet pas, dans de nombreux cas, de s'assurer de leur plus-value.

Le problème lié aux méthodes d'ingénierie système est double : l'orientation fonctionnelle de l'analyse tend à maximiser l'automatisation et à placer le client final au centre des attentes (par exemple, le client qui va acheter des produits). En outre, les concepteurs tendent à simplifier les signaux et informations à capter en préparation d'une automatisation cible. Prenant en compte la multitude des acteurs concernés et la complexité de leurs échanges, il est commun de voir se perdre des informations autrement utiles à un opérateur. Cette approche est qualifiée de « techno-centrée » (Trentesaux and Millot 2016) car elle prend en compte les aspects techniques du système en priorité et ce au détriment des opérateurs qui jouent un rôle essentiel dans l'atteinte des objectifs du système.

2. Une conception centrée sur l'humain

Une approche de conception centrée sur l'humain soutient que le développement d'un système doit inclure non seulement le client final, mais aussi tous les acteurs interagissant avec le système et ceci, dès les premières phases de conception. Les opérateurs doivent également rester impliqués dans la phase de conception jusqu'à l'achèvement du système, afin de s'assurer que le système soit adapté à leurs besoins. Cette idée n'est pas exclusive à la conception centrée sur l'humain, certaines méthodes techno-centrées (cf. méthodes agiles) prévoient également la participation des utilisateurs mais à un moindre degré.

Cependant, comme le pointe Scacchi (2004), le principe de conception participative présente des défauts. En effet, les opérateurs n'ont pas forcément les connaissances nécessaires à la conception d'un système. En cela, leur « participation naïve » (Scacchi, 2004) peut avoir des résultats contre-productifs dans la conception du système. C'est pour pallier ce problème que les recherches dans le domaine de la conception centrée sur l'humain se sont portées sur l'analyse de l'activité de l'utilisateur. Il s'agit alors d'un travail entre les utilisateurs, disposant d'une certaine connaissance du système, et les concepteurs, cherchant à utiliser ces connaissances à des fins de conception ; ce travail est orchestré et médiatisé par les ergonomes.

2.1 Interaction avec le système

L'interaction est un aspect critique lors de l'étude de système, car la définition d'un système fournie par l'INCOSE (cf. chapitre 3.1) rappelle que c'est l'interaction entre les parties du système qui produit le comportement ou le but caractéristique du système. Dans ce contexte, nous considérons l'interaction comme l'ensemble des facteurs provenant d'une entité tierce entrant en ligne de compte lors de la réalisation d'une tâche, ou l'expression d'un comportement. Deux parties du système peuvent donc interagir indirectement en évoluant dans le même environnement, sans pour autant partager une activité (limitation des interférences avec l'autre, par exemple). Cependant un aspect plus intéressant dans notre cas concerne les interactions directes : celles lors desquelles deux parties du système partagent une activité ou celles où les activités sont directement liées. Dans ce cas, le comportement exhibé change en fonction des entités en interaction, bien que l'activité puisse ne pas changer (par exemple, l'utilisation d'une langue ou d'un vocable approprié). Un domaine particulièrement touché par les travaux sur l'interaction est celui de l'informatique. Ce domaine relativement nouveau au début des années soixante-dix représentait une nouvelle façon d'interagir avec un système, car celui-ci possède son propre langage et sa propre logique, tout en étant polyvalent et pouvant réaliser des tâches complexes. De nombreuses recherches ont donc porté sur l'utilisation d'un ordinateur (et des technologies assimilées) afin de produire des interfaces plus adaptées, plus ergonomiques, pour les utilisateurs. On retrouve ces travaux sous le terme « human-computer interaction » ou HCI (Dix et al. 2003). Cependant, ces recherches tendent à oublier que dans certaines configurations, le système sur lequel un opérateur humain travaille existe au-delà de l'interface, de l'ordinateur, notamment via ses contrôles et actions sur des systèmes déportés, ce qui débouche sur le besoin d'une vision à la fois plus automatique et humaine des processus.

D'autres travaux ont été menés dans un cadre plus large en intégrant conjointement les apports et contraintes des aspects humains et techniques. Prenant pour exemple les travaux de Hoc and Amalberti (2007), dans lesquels on observe une attention particulière à la relation entre l'utilisateur et le système contrôlé. Il n'est pas seulement question de la façon dont l'utilisateur interagit avec le système, mais aussi de la façon dont il aborde les tâches d'un point de vue cognitif. Un des aspects importants souligné par ces travaux est le fait que l'état cognitif de l'utilisateur évolue en même temps que le système. Les besoins de l'utilisateur du système peuvent donc évoluer dynamiquement et être difficiles à identifier si une méthode adaptée n'est pas employée. C'est également pourquoi Hoc

(2000) soutient l'idée qu'il faut étudier non pas uniquement la façon dont l'utilisateur interagit avec le système mais, de façon plus globale, la coopération qui s'instaure entre le système et l'utilisateur.

Ces travaux s'appuient notamment sur ceux de Rasmussen et la taxonomie « Skill-Rule-Knowledge », ou SRK (Rasmussen 1983). Celle-ci établit qu'un opérateur peut être amené à travailler en utilisant trois niveaux de régulation de ses activités ou, « modes de contrôle » :

- Skill (habiletés) : une action effectuée immédiatement, tel qu'un réflexe, qui ne nécessite pas de réflexion. Un exemple est l'appui sur un bouton d'arrêt d'urgence dès le déclenchement d'une alarme.
- Rule (règles) : il s'agit en général de suivre une procédure associée à une situation familière et pour laquelle des règles prédéfinies sont connues. Par exemple, l'inspection de chaque élément d'une machine-outil lors d'une maintenance est réalisée de façon semblable entre deux machines-outils.
- Knowledge (connaissances) : relèvent de ce niveau les activités nécessitant une construction de connaissance, pour lesquelles aucune règle n'a encore pu être définie. C'est l'exemple d'un problème constaté sur une machine-outil mais que le protocole de maintenance ne suffit pas à résoudre. Il convient alors d'analyser toutes les informations à disposition à l'aide des connaissances disponibles, pour pouvoir déterminer la marche à suivre.

Ce modèle a été exploité dans différents cadres, notamment dans le cadre des activités coopératives (Schmidt et al. 1991) faisant intervenir l'utilisateur et le système. L'utilisateur dispose d'habiletés, de règles et de connaissances pour coopérer avec le système. Le recours aux différents niveaux de comportement dans le cadre de la coopération dépend, notamment, de la formation et de l'expérience qu'a l'opérateur sur le système (Habib et al. 2017a). La relation entre le système et l'utilisateur vis-à-vis de la tâche à effectuer évolue suivant ces niveaux et selon les besoins de l'utilisateur. Ainsi elle peut passer de la supervision d'un système autonome ne requérant que les niveaux « Skills » ou « rules », à une reprise en main du système nécessitant le recours au niveau « Knowledge ».

Les activités déployées pour le contrôle d'un système peuvent également se structurer en considérant plusieurs niveaux décisionnels, tels que les niveaux stratégique, tactique et opérationnel (Michon 1985a) (voir Figure 5). Un croisement récent entre les deux

représentations a été proposé par Flemisch et al. (2019), pour préciser que les niveaux SRK peuvent se retrouver sur chacun des niveaux décisionnels.

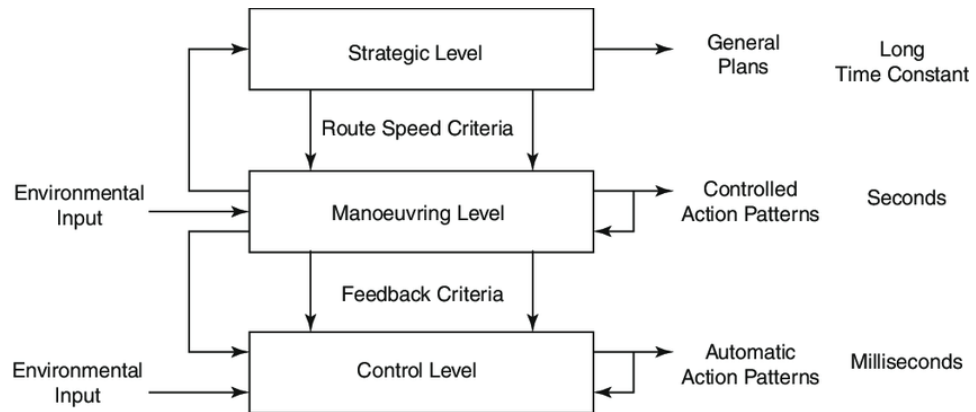


Figure 5 Schéma du modèle hiérarchique de Michon (1985).

D'autres travaux portent plus particulièrement sur l'aspect cognitif de la relation entre l'utilisateur et le système (Rook and Donnell 1993; Moray 1998). Comment un opérateur humain perçoit-il le système ? Comment cette perception est-elle utilisée pour prendre des décisions ? Ces questions sont essentielles pour ceux qui souhaitent faire travailler en bonne synergie un système artificiel et un opérateur humain. Il faut en effet faire en sorte que la représentation du système par l'utilisateur et son état réel soient aussi proches que possible pour éviter des erreurs (cf. incident de Three Miles Island). Pour cela, il est nécessaire de comprendre la relation entre ce qui est présenté à l'utilisateur et ce qui est perçu puis compris.

Il en va de même pour les moyens d'action sur le système, qui doivent permettre à l'opérateur humain de mettre en œuvre les seules actions évaluées comme pertinentes. Il est important d'identifier comment l'opérateur humain construit son plan d'action de façon à ce que le système l'implémente fidèlement en cas de délégation de fonction. Il convient en effet d'éviter les conflits entre les opérations menées par le système et les opérations désirées par l'opérateur. Un système générant de tels conflits aurait tendance à provoquer une transgression ou un contournement des règles et des fonctions par l'opérateur humain (Elffers et al. 2003). Il faut que l'opérateur humain puisse exploiter ses capacités d'analyse et de résolution de problème, et qu'il ne soit pas amené à résoudre des conflits ou à chercher à contourner le système.

Un exemple de transgression peut être observé dans la situation simple suivante : une porte coupe-feu est placée sur un trajet fréquemment emprunté par une personne pour déplacer du matériel encombrant. Dans de nombreux cas, la personne bloque la porte pour

faciliter ses déplacements au mépris des règles de sécurité. Dans ce cas précis, la porte fermée représente un frein à l'action choisie par l'opérateur. De plus, l'opérateur aura tendance à considérer la porte coupe-feu comme inutile dans la situation actuelle, renforçant le sentiment d'avoir pris la bonne décision en supprimant ce frein. Il s'agit d'une décision logique dans une situation où l'opérateur ne s'attend pas à un incident et cherche à fournir un effort limité.

A l'opposé, un système fermant automatiquement la porte en cas de besoin mais la laissant ouverte pour ne pas gêner l'opérateur serait moins susceptible de provoquer une transgression. De ce fait, dans cette situation précise, rendre le système flexible aurait tendance à produire de meilleurs résultats. Cela ne remet pas en cause l'aspect fonctionnel du système (protection incendie) mais facilite l'activité de l'utilisateur. Ainsi, il est important d'analyser la façon dont le système est perçu par l'opérateur. Dans leur ouvrage, Manktelow and Chung (2004) présentent de nombreux travaux portant sur la représentation du système et reposant sur la notion du modèle mental. Le modèle mental est, selon Moray (1998), le « mapping of the properties of the task to its representation in the mind of the worker ». Le modèle mental est un aspect important à considérer, car il s'agit de la structure cognitive qui permet à l'utilisateur d'interpréter l'évolution du système et de construire son action en conséquence. Il est donc important de transmettre des informations pertinentes fiables afin de faciliter l'élaboration d'un modèle mental correct. De même, Flach (2012) considère qu'un système, même complexe, peut être finalement compréhensible et compris à condition de posséder la connaissance adéquate.

2.2 Organisation du travail et allocation des tâches

Un autre aspect important dans la conception centrée sur l'humain est l'organisation du travail et l'allocation des tâches et fonctions entre l'humain et la machine. Dans un système purement technique, il est rare que le système s'auto-organise et alloue les tâches et/ou fonctions dynamiquement (bien que les récents travaux de recherche le permettent maintenant dans une certaine mesure). L'organisation du système est généralement définie de manière statique à l'origine (lors de la conception) et ne reçoit de changements que par l'intervention humaine. A l'opposé, l'organisation humaine tend à être très dynamique, s'adaptant aux besoins et contraintes. Dans ce domaine, Helbing (2012) présente un cas simple et commun d'auto-organisation humaine au sein d'une foule en mouvement.

Dans un contexte plus industriel, un utilisateur peut par exemple requérir de l'aide auprès d'un autre utilisateur en fonction des besoins. Il peut alors s'agir d'un savoir-faire spécifiquement recherché, ou d'un moyen de partager une tâche ne pouvant être achevée seul (Fehr and Schmidt 1999). Il peut être également nécessaire de planifier une tâche régulièrement, dans le but de prévenir une perte de compétence (exercices) ou au contraire de limiter la répétition d'une tâche pour le bien-être de l'utilisateur. Il est donc important de prendre en compte les différents facteurs influençant l'allocation des tâches, afin de fournir un environnement propice à cette organisation spontanée.

De plus, il faut considérer les flux d'informations au sein de l'environnement de travail. Dans de nombreux cas, une information est détenue par un groupe A mais nécessaire au groupe B pour réaliser une tâche correctement. De nombreuses questions peuvent alors se poser. Doit-on fusionner les groupes ou les laisser travailler indépendamment ? Dans quel format l'information doit-elle être transmise ? Cet aspect est dépendant de nombreux facteurs (situation, compétence, coopération, ...) et son étude n'en est que plus complexe. Cependant, c'est au travers de cet aspect que l'on approche au plus près la composante dynamique du système.

De nombreux travaux portant sur l'opérateur humain et son activité sont réalisées dans le domaine de l'ergonomie cognitive (Dix et al. 2003; Chauvin et al. 2008; Gorecky et al. 2014). Ces travaux mettent en exergue l'étroite relation entre l'activité humaine et les systèmes opérés et questionnent notamment la relation entre les systèmes automatisés et l'activité cognitive. Si au début un clivage pouvait être observé entre la conception centrée sur l'humain et la conception techno-centrée, un rapprochement s'est produit. Il est justifié par le fait que l'intérêt économique et le bien être des opérateurs humains sont étroitement liés (Hoc 1998). Les évolutions autour d'une conception plus humaine et durable des systèmes industriels poussent également à ce rapprochement (Trentesaux and Caillaud 2020).

3. Méthodes de conception intégrée

En se basant sur les travaux de l'ergonomie cognitive, plusieurs méthodes ont été développées afin de permettre à la fois d'étudier et de concevoir un système humain-machine, en s'adaptant aux spécificités de l'opérateur humain. Elles sont rassemblées sous le mot clef « Socio-Technical Systems Engineering », ou STSE. Ces méthodes ont pour but de fournir à un concepteur les informations nécessaires à la création d'un

système Humain-Machine efficient (Baxter and Sommerville 2011). Il y a cependant de nombreux aspects traités par l'ergonomie cognitive et toutes les méthodes développées ne traitent pas forcément des mêmes aspects. Nous présentons plusieurs de ces méthodes afin de souligner cette diversité.

3.1 Hierarchical task analysis

Le « hierarchical task analysis » est une méthode initiée par Annett and Duncan (1967) qui se concentre sur l'étude des tâches au sein d'un système. Cette méthode s'appuie sur un principe de performance et sur l'identification des facteurs qui nuisent ou peuvent nuire à la performance du système. Cette méthode propose une approche que l'on peut considérer comme récursive car elle est répétable jusqu'à ce que l'objet de la recherche soit atteint.

Chaque tâche au sein du système est découpée en sous-tâches jusqu'à atteindre un degré de précision satisfaisant selon les critères de l'utilisateur. Chaque sous-tâche est définie par un élément déclencheur, un objectif, ainsi qu'une série d'actions pour atteindre l'objectif et un retour qui permet de confirmer son atteinte. Ces ensembles de sous-tâches sont regroupés au sein d'un « plan » et peuvent être catégorisés en tant que procédure ou partage de tâche, par exemple. Chaque catégorie de plan peut avoir sa propre organisation interne. Ainsi, une procédure a en général une liste séquentielle de tâches, alors qu'une résolution de problème pourrait avoir l'apparence d'un arbre décisionnel. Plus de détails peuvent être trouvés dans Annett (2003) .

Cette méthode propose un principe simple qui permet une application relativement large. En effet, cette méthode ne restreint pas les sources d'information. Cependant, cette méthode requiert que l'utilisateur de la méthode ait une expérience préalable en ergonomie cognitive pour traduire les résultats obtenus en éléments de conception. De plus, si cette méthode semble fournir une décomposition exhaustive du système, celle-ci ne semble pas prendre en compte d'autres facteurs tels que l'organisation au sein du système, ou même les divers agents la composant ainsi que leurs propres compétences. Cette méthode est donc intéressante, mais elle est ancienne ; elle considère que les systèmes artificiels sont complètement spécifiés et très peu autonomes. Elle n'a pas été conçue dans un contexte où des entités artificielles cohabitent avec des opérateurs humains tels que considérés dans cette thèse.

3.2 Cognitive Work Analysis

La « Cognitive Work Analysis » est une méthodologie développée par Rasmussen et al. (1990, 1994) et Vicente (1999) employant une approche dite formative, où l'accent est mis les contraintes existant dans un système donné. Ce type d'approche offre une vue des contraintes et du champ des possibles au sein du système, et permet d'identifier les possibilités d'action. Un avantage de cette approche est qu'elle permet de borner le domaine au sein duquel un opérateur humain prend ses décisions et agit (voir Figure 6). Dans un cas normal, seule une partie de ce domaine est exploitée. Dans une situation inhabituelle, le reste du domaine correspond aux ressources à disposition grâce auxquelles l'opérateur humain peut exercer sa créativité afin de trouver une solution innovante. Ce champ des possibles est identifié au travers des cinq étapes suivantes.

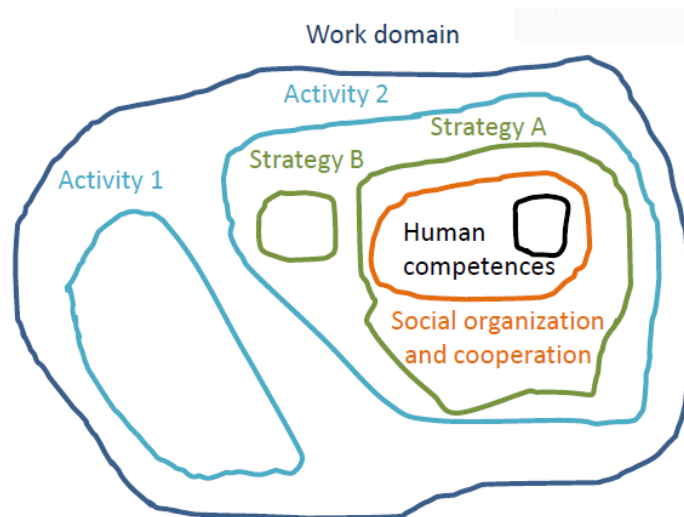


Figure 6 Schéma explicatif du bornage du domaine dans lequel l'humain agit

Le « Work Domain Analysis » est la première étape ; elle répond à la question « sur quoi travaille-t-on ? ». Elle peut paraître apparentée, au premier abord, à une analyse fonctionnelle classique en ingénierie système. Cependant, elle vise à identifier les contraintes inhérentes au système étudié, plus que les fonctions mises en œuvre. Pour réaliser cette étape, un outil a été mis en place : la hiérarchie d'abstraction et de décomposition. Cet outil structure le système étudié selon deux dimensions : la dimension structurelle avec la notion de sous-systèmes (décomposition) d'une part et la relation moyen-but (abstraction) d'autre part. La relation moyen-but est analysée selon 5 niveaux décrits par Naikar (2016) :

- Le but fonctionnel correspond à l'objectif du système ou sous-système étudié et doit pouvoir justifier chaque fonction du système.

- Les valeurs et mesures de priorité sont les métriques qui permettent de vérifier que le système répond au but fonctionnel.
- Les fonctions générales sont des fonctions abstraites qui ne peuvent être directement associées à l'activité d'un objet et qui permettent de remplir le but du système en répondant aux indicateurs de valeur et de priorité. (ex : satisfaire le client).
- Les processus liés aux objets composent les fonctions liées au but, mais contrairement à ces dernières, elles correspondent directement à l'activité réalisée par un objet.
- Les objets physiques sont quant à eux les composants même du système. Il s'agit généralement d'actionneurs et de capteurs réalisant les fonctions du système.

Ce découpage est réalisé autant de fois qu'il y a de sous-systèmes considérés d'intérêt dans l'analyse. Le résultat est ensuite présenté dans un tableau à deux dimensions (« Abstraction Decomposition Space »), où la relation moyen-but est représentée de haut en bas et le découpage en sous-systèmes de gauche à droite (voir Figure 7). Les liens moyen-but sont tracés entre les éléments de telle sorte que la propagation des contraintes régissant le système, ainsi que les ressources disponibles pour répondre à une problématique, soient observables.

Il est important de noter que cette étude se fait sans tenir compte des acteurs et de leurs influences possibles sur le « domaine de travail ».

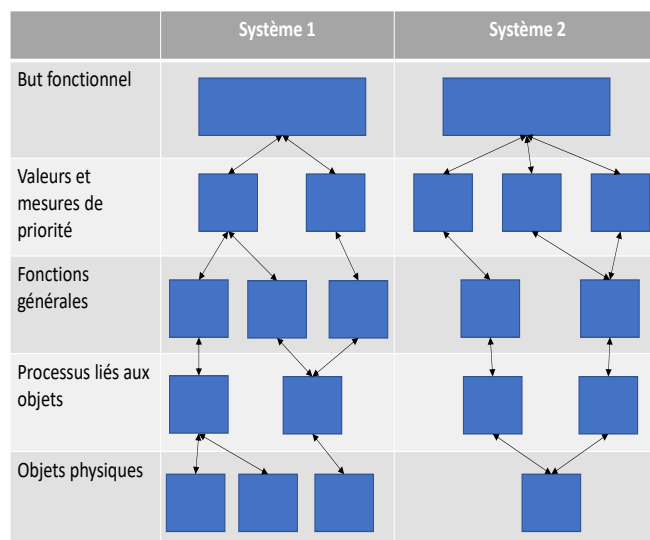


Figure 7 Schéma de l'Abstraction-decomposition space

La deuxième étape, le « Contextual Task Analysis » permet d'ajouter un aspect dynamique à cette analyse, en étudiant les tâches devant être réalisées au sein du système en fonction des différentes situations possibles. Elle répond à la question « Quoi » ou « Que fait-on » ? Les tâches étudiées sont dites prototypiques ; on cherche en effet à décrire, à ce stade, des tâches génériques et non pas des tâches particulières. Les tâches étudiées correspondent aux fonctions générales identifiées lors de l'étape précédente. Cette étude peut débuter par une analyse des situations de travail. Elle sera formalisée par un graphique d'états montrant les situations principales et les transitions entre ces situations. Ensuite, Naikar et al. (2006) préconisent l'emploi d'un tableau à deux dimensions (« Contextual Activity Template ») pour représenter les tâches réalisées dans chaque situation. Ce tableau permet d'identifier les tâches qui sont typiquement employées dans une situation, celles qui peuvent l'être occasionnellement et celles qui ne le sont pas (voir Figure 8, B). Cette visualisation permet d'identifier les informations et tâches pertinentes pour un opérateur humain dans chaque situation. Elle peut être complétée par des échelles décisionnelles, telles que prévues initialement par Rasmussen (voir Figure 8, A), afin d'aboutir à une représentation fine des tâches dans chaque situation. Les travaux de Guerin et al. (2019) présentent une utilisation conjointe de ces différentes représentations dans l'analyse d'un système manufacturier.

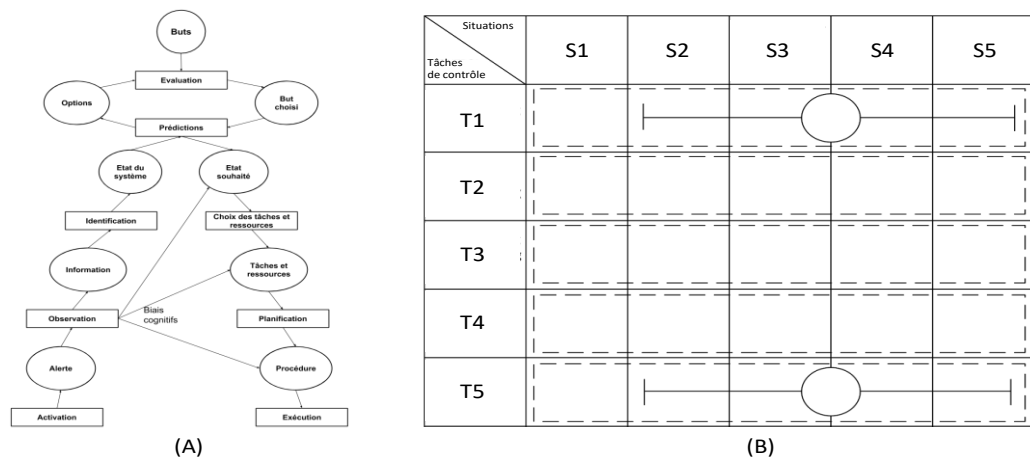


Figure 8 Schéma d'une Échelle décisionnelle (A) et du « Contextual Activity Template » (B)

La troisième étape, nommée « Strategies Analysis », consiste à identifier les différentes stratégies permettant de réaliser les tâches de contrôle précédemment analysées. Elle répond à la question « Comment ? ». Par extension, il s'agit également d'identifier les critères qui poussent un opérateur humain à choisir une stratégie plutôt qu'une autre. Sur

cette base, il est possible d'aider un opérateur humain à choisir la stratégie la plus adaptée et de lui fournir les outils en conséquence. Pour réaliser l'analyse, il est préconisé d'établir une carte des flux d'information (« information flow map »). Il faut cependant noter qu'il s'agit de l'étape la moins développée du CWA.

La quatrième étape, « Social Organization and Cooperation Analysis », correspond à l'analyse de l'organisation globale du système étudié. Elle répond à la question « Qui » ? Un aspect intéressant de cette étape est la réutilisation des graphiques établis lors des étapes précédentes. En effet, il est possible d'ajouter à ces graphiques des pastilles de couleur afin d'identifier quel agent réalise une fonction donnée. Il est donc possible d'identifier les tâches/fonctions partagées et au contraire, celles qui sont réalisées par un agent en particulier. Cette étape peut être complétée par un graphique représentant les différents groupes d'agents au sein du système et les relations qu'ils entretiennent.

Pour finir, la cinquième et dernière étape, intitulée « Worker Competencies Analysis » établit, pour chaque type d'agent, les compétences nécessaires à l'activité confiée. Cette analyse s'appuie sur le modèle « Skill-Rule-Knowledge » de Rasmussen (Kilgore and St-Cyr 2006) déjà présenté (cf. chapitre 2).

Une fois ces étapes menées, il est à la charge du concepteur d'en extraire les conclusions saillantes et de proposer une conception du système basée sur cette analyse. La méthodologie CWA ne fournit pas de guide permettant de traduire les résultats de l'analyse en recommandations pour la conception ; cependant, elle devrait permettre à un concepteur d'extraire des informations utilisables dans le cadre d'un projet visant à transformer un système existant ou à concevoir un nouveau système. Il est, en particulier, possible d'utiliser cette analyse dans le cadre de la conception d'interface, en utilisant le cadre de l'« Ecological Interface Design » (Jamieson 2003; Read et al. 2012). Bien qu'elle présente cette difficulté, inhérente à la traduction des résultats de l'analyse en principes de conception, cette méthodologie nous semble appropriée à la conception de systèmes industriels cyber-physiques intégrant l'humain.

3.3 Modèle de Coopération Humain-Machine

Deux agents d'un système sont en situation de coopération durant une tâche si chacun des agents vise des buts qui interfèrent avec les buts de l'autre (Principe d'interférence) et s'ils essaient de gérer ces interférences de façon à faciliter l'activité de l'autre (Principe de facilitation) (Hoc 1996).

Le modèle de Coopération Humain-Machine se concentre sur la description de la relation entre deux agents (humains ou artificiels) travaillant de façon coopérative. Il s'appuie sur deux capacités principales des agents : le savoir-faire des agents et leur savoir-coopérer (Pacaux-Lemoine 1998, p. 98). Le savoir-faire renvoie aux compétences de chaque agent, nécessaires à la réalisation de certaines tâches au sein du système. Le savoir-coopérer est défini par les compétences liées aux tâches coopératives de communication, d'organisation et d'adaptation de chaque agent vis-à-vis des autres agents. Le savoir-faire peut être représenté par quatre fonctions principales, qui peuvent être extraites du modèle de la prise de décision proposé par Rasmussen (cf. l'échelle décisionnelle présentée plus haut). Elles représentent les fonctions sur lesquelles un partage peut être construit entre les agents humain et artificiel (Parasuraman et al. 2000) :

- La prise d'information
- L'analyse de l'information
- La prise de décision
- L'application de la décision

Il doit être possible, à l'issue de l'analyse du savoir-faire, d'identifier les points forts et les points faibles de chaque agent, ainsi que les spécificités de chacun dans la façon de réaliser une fonction donnée. Cependant, cette information seule ne suffit pas à la conception du système. C'est, en effet, le savoir-coopérer qui apporte les compétences nécessaires permettant d'assurer la complémentarité entre les savoir-faire des acteurs, de gérer l'allocation des tâches (capacités, autorité, responsabilité) et de s'assurer d'une communication constructive (Pacaux-Lemoine 2020).

En effet, une situation dans laquelle deux agents sont compétents mais incapables de coopérer efficacement n'est pas souhaitable ; la gestion des conflits durant la coopération ferait en effet chuter l'efficacité globale. Cet aspect est présent dans toute coopération, qu'il s'agisse d'une relation Humain-Humain, Humain-Machine ou même Machine-Machine. C'est pourquoi les fonctions du savoir-faire doivent être complétées par l'identification des compétences en matière de coopération. Le savoir-coopérer se décline aussi en quatre fonctions : la prise d'information sur l'autre acteur, l'analyse de cette information pour détecter les interférences avec les activités de l'autre acteur (savoir-faire et savoir-coopérer), la gestion de ces interférences et l'application de décision concernant la coopération, notamment pour l'allocation de fonction. Il est alors possible d'identifier les problèmes pouvant survenir lors d'une coopération, ainsi que les opportunités de bénéficier des compétences de l'autre agent puis accepter les points de vue de l'autre,

imposer ses propres points de vue ou négocier (Pacaux-Lemoine and Debernard 2002). Les agents peuvent notamment s'aider d'un « Espace de travail commun » (Pacaux-Lemoine and Debernard 2002), support de la coopération qui permet aux agents de partager leur savoir-faire, de prendre connaissance du savoir-faire de l'autre sur des situations données, d'élaborer une représentation de l'autre afin de tenter de reconnaître ses intentions et d'anticiper les interférences, et ce en s'appuyant sur le savoir-coopérer.

Sur la base de ces définitions, les travaux de Habib et al. (2017b, 2018) suggèrent que l'utilisation des niveaux d'automatisation tels que définis par Sheridan (2011) fournit des résultats probants pour adapter de façon dynamique le partage des fonctions du savoir-faire des agents en fonction des situations et des agents. Une évolution de la méthode en U proposée par Millot and Roussillon (1991) a été étendue pour intégrer les notions de savoir-faire et savoir-coopérer et ainsi identifier les pistes de conception d'un système humain-machine et son évaluation (Pacaux-Lemoine and Flemisch 2021). Ces analyses sont généralement employées aux niveaux opérationnel, tactique et stratégique du système afin de gérer également la coopération entre ces niveaux décisionnels.

4. Le choix du CWA

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, le CWA présente plusieurs aspects que l'on a estimés intéressants et qui en ont fait l'outil retenu pour nos travaux. En effet, le CWA semble concilier l'approche centrée technique et l'approche centrée humain en intégrant les contributions des deux domaines. Cette méthodologie peut, de plus, être utilisée pour penser la conception de systèmes entièrement nouveaux, qui restent à imaginer tant dans leur structure que dans leur organisation. Cela en fait une approche dite « intégrée », compatible avec les deux approches précédemment citées ; ceci facilite le partage des connaissances issues de chaque approche et permet à la fois de considérer les volets humains et techniques. Il s'agit d'un point particulièrement important dans le domaine des systèmes industriels cyber-physiques intégrant l'humain.

Par ailleurs, et comme décrit par Rasmussen (1997) et plus tard par Vicente (1999), certaines approches ne sont pas adaptées à la conception de systèmes fortement dynamiques.

D'une part, certaines méthodes sont considérées comme trop normatives : l'accent est mis sur une façon idéale de réaliser chaque tâche, ce qui conduit à rigidifier l'ensemble du

système en réduisant les marges de manœuvre parfois utiles pour faire face à l'inconnu. Le système résultant tend à être déconnecté de la réalité du terrain. Un système industriel est soumis à de nombreuses perturbations non prévues et l'opérateur humain ne suivra pas toujours les procédures standards. Ce dernier point est très intéressant, car la créativité d'un opérateur humain est généralement considérée comme une qualité dans la résolution de problème. Or le fait de contraindre l'opérateur à rester au sein d'un contexte défini par des procédures semble être l'exact opposé du principe consistant à le laisser exploiter sa créativité.

Il existe, d'autre part, les méthodes descriptives qui s'appuient sur l'analyse des situations courantes. En ce sens, elles semblent permettre une plus grande flexibilité et prendre en considération l'imperfection d'un système réel. En l'état, ces méthodes fournissent des résultats satisfaisants mais souffrent d'un manque de considération pour les situations imprévues ou relevant d'un contexte fortement innovant tel que celui de l'industrie du futur. Parce qu'il est impossible d'observer la totalité des situations possibles, la reproduction de l'existant limitera forcément la résilience du système face à de nouvelles situations.

Dans le contexte de l'industrie 4.0, le volume estimé de situations nouvelles/inattendues est plus élevé que dans les systèmes traditionnels. Ces deux types d'approches (normatives et descriptives) semblent donc mal adaptées. A l'opposé, le CWA propose une troisième façon d'analyser un système : une méthode formative basée sur les contraintes. En cherchant à délimiter le domaine des différentes tâches, il est possible de considérer plus de variabilité au sein des tâches. En utilisant une analogie mathématique, ce principe peut être perçu comme un bornage de la tâche, signalant que celle-ci aura toujours lieu dans un intervalle connu. Qui plus est, dans le contexte de systèmes hautement dynamiques et reconfigurables de l'industrie 4.0, la présence d'une étape d'analyse de l'organisation sociale et de la coopération au sein du système est un aspect important, qui justifie également l'utilisation de la méthodologie CWA.

Pour finir, le CWA est une méthode d'analyse non spécifique à un contexte applicatif donné, ce qui présente un intérêt majeur dans le cadre d'un système soumis à perturbations qui présente un degré de maturité industrielle relativement faible. L'industrie 4.0 bénéficie d'une base technologique en évolution constante. Cependant, la forme exacte que prendront les futurs systèmes de production reste inconnue. En faisant abstraction du contexte applicatif, il est possible de fournir des éléments de réponse à ces questionnements quant à la forme finale du système. C'est ensuite sur cette base, que des

méthodes plus spécifiques, telles que celles exploitant le modèle de coopération Humain-Machine, pourront être envisagées et articulées.

Nous avons ainsi choisi de tester l'hypothèse suivante :

Un modèle de pilotage intégrant l'humain construit sur la base du CWA permettrait de concevoir un système permettant à l'humain de contribuer efficacement au fonctionnement de systèmes industriels cyber-physiques, notamment dans le contexte incertain que constitue l'usine du futur.

Cette hypothèse sera testée sur le cas d'un atelier flexible (manufacturier) de production, en considérant uniquement les niveaux bas, opérationnels et temps réels et uniquement sur une fonction de pilotage et supervision de la production.

5. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les éléments amenant à distinguer une conception technocentrée et une conception centrée sur l'humain. En nous appuyant sur ces différences, nous avons présenté un état de l'art portant sur plusieurs approches et méthodes pour l'analyse et la conception de systèmes socio-techniques. Notre choix s'est porté sur la méthode CWA et ce choix a été justifié. Nous avons souligné, en particulier, l'intérêt que représente la prise en compte des facteurs humains et organisationnels dans la conception de systèmes complexes évoluant dans des environnements dynamiques. Le chapitre suivant porte sur l'analyse et la conception d'un système de production cyber-physique intégrant l'humain et reposant sur la mise en œuvre de la méthodologie CWA.

CHAPITRE 3 : ANALYSE ET CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION HUMAIN- CYBER-PHYSIQUE A L'AIDE DU CWA

Le CWA possède des caractéristiques intéressantes pour ceux qui souhaiteraient concevoir un système de production industriel cyber-physique intégrant l'humain. Nous avons fait le choix de limiter l'étude aux systèmes de production cyber-physiques (CPPS), et plus précisément à ceux qui sont construits sur la base d'une cellule de production flexible en nous focalisant sur la fonction de pilotage/supervision au niveau opérationnel. Le passage au contexte « Industrie 4.0 » se fait par le biais de l'ajout d'un niveau d'intelligence au sein de différentes entités (produit, ressource, robot) afin d'assurer de manière autoorganisée certaines activités relevant de la production ou de la logistique. Certaines de ces activités peuvent alors être menées de manière complètement autonome ou sous la direction d'un opérateur via un système d'aide ou d'assistance. Cette restriction du fonctionnement à ce qui peut être vu comme un cas très particulier d'un système industriel du futur nous permet toutefois de travailler dans un cadre à la fois très opérationnel et quantifiable mais aussi très générique malgré tout, car elle permet de conserver toutefois une vision assez généraliste permettant l'inclusion à la fois d'un opérateur et de plusieurs technologies innovantes (cf. Chapitre 1) de l'industrie 4.0.

La première partie de ce chapitre portera sur l'analyse du système, en commençant par une description détaillée de celui-ci, suivie des différentes étapes de l'analyse CWA. La seconde partie synthétisera les différentes informations extraites lors de l'analyse et cherchera à mettre en relief les points importants identifiés lors de l'analyse afin de permettre une conception pertinente d'un système homme-machine.

1. Description et analyse du système

Le système étudié, une cellule de production flexible, est constitué de postes de travail desservis par un convoyeur à une dimension. Sur ce convoyeur circulent des navettes autonomes ayant pour objectif d'amener les produits aux postes de travail adéquats. Il s'agit de la partie intelligente du système, car les navettes prennent d'elles-mêmes la décision quant à la destination et le chemin à suivre pour atteindre leur objectif. La méthode de décision, basée sur les champs de potentiel, est présentée plus en détail en annexe (voir Annexe 6). Les postes de travail peuvent accueillir à la fois des bras robotiques ou des opérateurs, bien que dans notre configuration il s'agisse principalement de robots. La cellule de production flexible est complétée par un système de logistique, composé de robots mobiles, ayant pour but d'assurer l'approvisionnement de la cellule de production en matières premières et le déchargement des produits finis. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la gestion opérationnelle du système lors de la production, plus qu'à la réalisation des tâches par les robots. Ces différentes parties du système sont analysées dans les sous-parties suivantes. Le lecteur peut se référer à la description des différentes étapes du CWA données dans le chapitre précédent, étapes reprises ici les unes après les autres. Concernant la composition du système, il est possible de se référer au chapitre 1 ou à l'ouvrage de Julien and Martin (2021).

1.1 Analyse du domaine de travail (WDA)

L'analyse du domaine de travail a pour objectif de formaliser les contraintes liées au fonctionnement du système, qu'il s'agisse de contraintes physiques, structurelles ou fonctionnelles. Pour cela, le ou les objectifs du système doivent être identifiés, puis la relation finalité-moyens entre l'objectif et les composants du système doit être établie. Le « Abstraction Hierarchy », est utilisé afin de représenter ces relations (voir Figure 9). Cette représentation peut être lue de bas en haut, afin d'appréhender la raison d'être d'une fonction et les informations nécessaires à sa réalisation, mais également de haut en bas afin de comprendre comment la fonction a été développée à partir d'une contrainte donnée (Rasmussen et al. 1994). Cette étape est réalisée sans prendre en considération les agents qui réaliseront les fonctions ; le terme « agent » désignant ici une entité décisionnelle, qu'il s'agisse d'humain ou de machine.

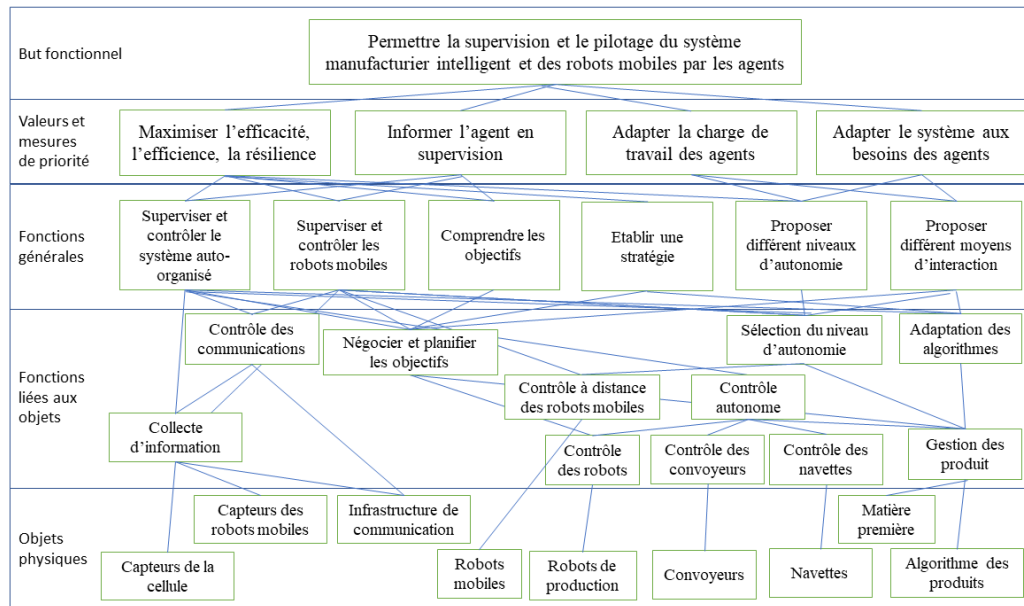


Figure 9 Work Domain Analysis du système de pilotage et supervision d'un système manufacturier intelligent

Le premier niveau à identifier est le *but fonctionnel* du système, soit sa raison d'être. Un point important ici est la notion d'autorité du superviseur, qui est considéré comme responsable de l'opération du système ; d'un point de vue légal et fonctionnel, un superviseur humain est nécessaire en permanence. La notion de superviseur fera donc référence à un superviseur humain dans la suite de cette thèse. Ces notions d'autorité et de responsabilité sont notamment abordée par Flemisch et al. (2012) dans le cadre d'un système humain-machine, ainsi que les notions de contrôle et de compétence. Ainsi le système ne peut pas être considéré comme opérant de façon complètement autonome, car un superviseur humain doit pouvoir exercer son autorité à tout moment. Le but du système n'est donc pas de gérer la production, mais plutôt de permettre cette gestion. Toute activité dite « autonome » est donc simplement déléguée par le superviseur, mais celui-ci doit pouvoir regagner le contrôle de ces activités au besoin. Nous avons ainsi défini l'objectif du système comme tel : **Permettre la supervision et le pilotage du système manufacturier intelligent et des robots mobiles par les agents.**

Le superviseur agit ici comme une interface entre les besoins fonctionnels du système de production et les autres besoins de l'entreprise. Le superviseur va donc chercher l'équilibre entre différentes contraintes et le système devra l'y aider. Cela est observable au deuxième niveau du WDA :

Le deuxième niveau correspond aux *valeurs et mesures de priorité*. Il s'agit à la fois du moyen d'évaluer l'atteinte de notre objectif, mais également de justifier chaque fonction du système. Ces valeurs et mesures peuvent être directement liées à un certain nombre de contraintes. Nous pouvons présenter ces contraintes selon deux catégories principales, les contraintes fonctionnelles et les contraintes économiques.

Les contraintes fonctionnelles répondent à l'objectif du système de production qui est de produire, tout en incluant des contraintes propres au type de système, les système cyber-physiques dans notre cas (voir Cruz Salazar et al. (2019)). Ainsi la résilience, i.e. la capacité à maintenir une activité sous l'influence de perturbations (Académie française, 9^e édition), est une des valeurs primordiales à évaluer. Une perturbation, ou un cumul de perturbations qui viendrait à dépasser le seuil de tolérance du système, pourrait remettre en cause l'accomplissement de l'objectif du système. L'agilité et l'adaptabilité (parfois réactivité) correspondent de ce fait à la capacité à identifier ces perturbations et à y apporter une réponse au plus tôt. La possibilité d'apporter une réponse est cependant limitée aux ressources à disposition. A ce titre, la reconfigurabilité et la flexibilité du système sont également importantes, car il convient de disposer et de maintenir les compétences nécessaires pour finaliser la production, et non la bloquer en cas de perturbation. Suivant les architectures de contrôle choisies, certaines de ces contraintes peuvent être mises plus en avant que d'autres.

Les contraintes économiques répondent aux besoins financiers de l'entreprise, notamment par la satisfaction du besoin client. L'entreprise est en effet un « *organisme de nature industrielle ou commerciale, fournissant des biens ou des services* » (Académie française, 9^e édition). Il faut fournir un produit conforme aux attentes et à la date promise, sous peine de voir décroître le niveau de satisfaction. Les mesures principales à retenir sont donc le respect des délais et la satisfaction liée au produit fini. Le coût de production est également un élément important, car les entreprises cherchent généralement à maximiser les bénéfices, le prix de vente étant généralement imposé par le marché. Il est aussi désormais important de contrôler la consommation d'énergie, ainsi que la production de déchet, car toutes deux représentent une perte pour l'entreprise (Giret et al. 2015). Le point clef à retenir est qu'il est important de conserver une production aussi efficiente que possible. La différence entre l'efficacité et l'efficience réside dans cette prise en considération du coût, car l'efficacité est synonyme de faire « vite et bien » pour répondre aux objectifs alors que l'efficience recherche un rapport coût-revenu avantageux (voir

Trentesaux and Giret (2015)). Le coût et le revenu peuvent être de nature très différente suivant l'activité et leur calcul varier en conséquence.

Il existe quelques autres critères liés à l'agent de supervision en lui-même. Il est notamment nécessaire de fournir à l'agent toutes les informations dont il peut avoir besoin, tout en adaptant sa charge de travail (voir chapitre 1 et 2). Un agent superviseur manquant d'information ou au contraire débordé par le volume d'information et de tâches à réaliser ne pourra pas remplir son rôle correctement. De même, il est important d'adapter les interactions aux besoins du superviseur, qui peuvent changer en fonction de la situation. C'est notamment un point soutenu par le CWA qui cherche à identifier ce qui est pertinent en termes d'information et d'interaction pour une situation donnée. Le superviseur peut ainsi agir plus facilement et plus justement sur le système.

Pour résumer ce deuxième niveau, il est nécessaire de chercher à **minimiser le coût de production** et à **assurer une efficacité acceptable** pour atteindre les objectifs. Il faut également **assurer un niveau acceptable de sécurité** au sein du système afin que l'activité générale du système soit stable. Pour finir, l'adaptation de la charge de travail ainsi que des moyens d'interaction interviennent dans le but de faciliter l'accomplissement des objectifs intermédiaires par les agents.

Le troisième niveau présente les *fonctions générales*, qui représentent la façon dont le système évolue en fonction des valeurs et mesures de priorité. Pour répondre au but premier du système, le superviseur doit pouvoir intervenir sur le système (de production) auto-organisé, ce qui implique dans un premier temps de pouvoir interagir avec le système, et donc de **superviser et de contrôler le système auto-organisé**. De même, il est nécessaire de **surveiller et contrôler les robots mobiles**, qui agissent conjointement avec le système et sont responsables de son approvisionnement. Il faut également **proposer différents moyens d'interaction** et **proposer différents niveaux d'autonomie** du système. Ces points sont abordés dans le chapitre 2 et sont notamment relayés par les travaux de Sheridan (2011), Flemisch et al. (2012) et Pacaux-Lemoine (2020). En effet, il s'agit de systèmes complexes ne pouvant être entièrement contrôlés simultanément par un superviseur. Celui-ci doit donc pouvoir interagir de façon constructive avec le système et doit pouvoir lui déléguer une partie de son autorité lorsqu'il n'est pas en mesure de réaliser une des activités. Pour finir le superviseur doit pouvoir **comprendre les objectifs** et doit être en mesure d'**établir une stratégie**. Il s'agit du cœur de l'activité de supervision, répondant aux questions « pourquoi » et

« comment ». Ces fonctions sont la base de l'activité de supervision et se décomposent en de nombreuses sous-fonctions, qui vont être maintenant présentées.

Le quatrième niveau correspond aux *fonctions liées aux objets*, soit toutes les fonctions réalisées par un composant du système et qui composent une fonction générale. La fonction principale et indispensable au système est la **collecte d'information**, dont dépend un grand nombre de fonctions générales. Il s'agit d'un élément clef de la notion de CPS, qui s'appuie fortement sur la notion d'information. Sans cette fonction, il est impossible de connaître l'état du système et donc d'agir en connaissance de cause. Il peut s'agir à la fois de l'état de la production, mais aussi du respect des objectifs ou même simplement de la bonne exécution des ordres. D'une importance presque équivalente, le **contrôle des communications** consiste à s'assurer que les ordres et informations sont bien transmis ou que le superviseur est averti dans le cas contraire. Ce point n'est pas uniquement important du point de vue fonctionnel ; la cause (défaillance, acte malveillant, ...) et l'effet (non-respect du plan de production, impossibilité de stopper un robot, ...) peuvent aussi être liés à la sécurité du système. D'une manière générale, pour un système basé sur l'information (voir présentation des CPS chapitre 1), l'intégrité de l'information et sa bonne transmission sont critiques.

Chaque élément actif du système, i.e. chaque acteur (navettes, robots de production et robots mobiles), fonctionne à l'aide d'un système de **contrôle** dédié. Les possibilités de contrôle par le superviseur varient en fonction de l'acteur, principalement en fonction de l'algorithme qui gère son autonomie (HMS, MAS, ...). Une fonction permettant une interaction entre le superviseur et les autres fonctions de contrôle peut notamment être l'**adaptation des algorithmes**. Celle-ci permettrait au superviseur d'influer sur le fonctionnement de certains algorithmes, dans le but d'agir indirectement sur le système. Une fonction de **contrôle autonome**, complétée par une fonction de **sélection du niveau d'autonomie** permet un partage de fonctions entre le superviseur et un acteur (Sheridan 2011). Dans le cas d'un fonctionnement autonome, le superviseur doit néanmoins pouvoir **négoier et planifier les objectifs** à atteindre avec cet acteur, car il est seul à pouvoir prendre en compte un certain nombre des valeurs de priorité du système. Certains critères peuvent être en effet trop abstraits pour être automatisés efficacement (satisfaction, sécurité, ...) en l'état de la technologie. Pour finir, le superviseur dispose également d'une fonction de **contrôle manuel des robots mobiles et des navettes**, se passant donc entièrement de leur autonomie. Cette dernière fonction est notamment liée à la sécurité, car le haut degré de liberté des robots mobiles augmente le nombre de situations possibles.

Le superviseur se voit doté d'un contrôle manuel pour répondre à l'apparition de perturbations ou de nouveaux objectifs hors du champ de compétences des acteurs autonomes. La reprise en manuel d'un système est une fonction commune sur de nombreux systèmes au-delà de la production, notamment pour bénéficier de l'adaptabilité humaine lorsque le système échoue à affronter l'inconnu (voir chapitre 1).

Le cinquième niveau correspond aux *objets physiques*, soit les composants du système eux-mêmes. Il s'agit des éléments physiques tels que les **robots**, les **navettes**, les **robots mobiles**, les **capteurs**, les **convoyeurs** et les **matières premières**, mais aussi aux éléments numériques, tels que **l'algorithme de gestion des produits** et les **moyens de communication**. Ce niveau est très dépendant du cas d'étude et l'application du CWA sur un autre système de production générera vraisemblablement des résultats différents à ce niveau.

1.2 Analyse des tâches contextuelles (ConTA)

L'analyse des tâches vise à étudier le contenu des tâches de décision et les conditions dans lesquelles elles sont réalisées. Ce second angle de l'analyse a bénéficié de travaux récents (Naikar et al. 2006). Les deux approches sont complémentaires, car il est possible d'utiliser les échelles décisionnelles au sein même du « contextual activity template » de Naikar. Cela permet de produire des résultats plus précis, correspondant mieux aux situations, mais avec un coût supplémentaire. Il est en effet nécessaire, dans ce cas, de réaliser l'analyse de la tâche autant de fois qu'il existe des situations dans lesquelles elle est impliquée. Il peut donc être préférable d'appliquer cette analyse à un jeu plus réduit de situations si on est en mesure d'identifier les situations les plus intéressantes au regard des objectifs de conception.

Dans notre situation, système manufacturier intelligent où beaucoup reste à imaginer, nous ne disposons pas d'utilisateur expert, ce qui contraint l'analyse ConTA. Cette étape de l'analyse prône en effet la participation d'utilisateurs experts afin de renforcer les résultats. Nous ne pouvons ici nous appuyer que sur une analyse générale des tâches identifiées et notre expérience dans le domaine manufacturier. Cependant, à l'issue des premiers résultats, il pourra être envisageable de faire appel à des participants de façon régulière afin de travailler par la suite avec des opérateurs qui deviendront des experts du système.

Dans un premier temps, la compréhension des situations auxquelles doit faire face le superviseur permet de mieux cerner les activités à analyser. La Figure 10 représente les différentes situations que peut rencontrer le superviseur, ainsi que l'évolution qui peut survenir avec la transition vers d'autres situations. La situation 1 est le point d'équilibre du système, lorsque tout fonctionne de façon nominale, et représente le point de départ de la plupart des situations. La situation 2 représente un changement d'objectif et peut survenir dans différents contextes : l'objectif de production peut changer, les contraintes également (puissance admissible, ...), un problème perturbant l'accomplissement de l'objectif peut arriver.... La situation 3 correspond à un incident mineur, soit un incident à portée limitée à première vue. Il s'agit d'une situation où il faut estimer si l'impact est suffisamment faible pour pouvoir retourner à une situation nominale, ou si la situation est plus grave que prévue et évolue en incident majeur. L'incident majeur, correspondant au numéro 4 ; c'est une situation qui est évaluée comme pouvant avoir un fort impact sur le système. Il s'agit donc d'établir l'ampleur de l'impact et d'appliquer des mesures correctives rapidement. A la suite des correctifs, le superviseur évalue si une réévaluation des objectifs est nécessaire ou si un retour en fonctionnement nominal est possible. La dernière situation, numérotée 5, correspond à l'occurrence d'un incident externe pouvant avoir un impact sur le système de production. Cette situation est particulière car le superviseur a généralement peu de moyen pour agir face à ce genre d'événement.

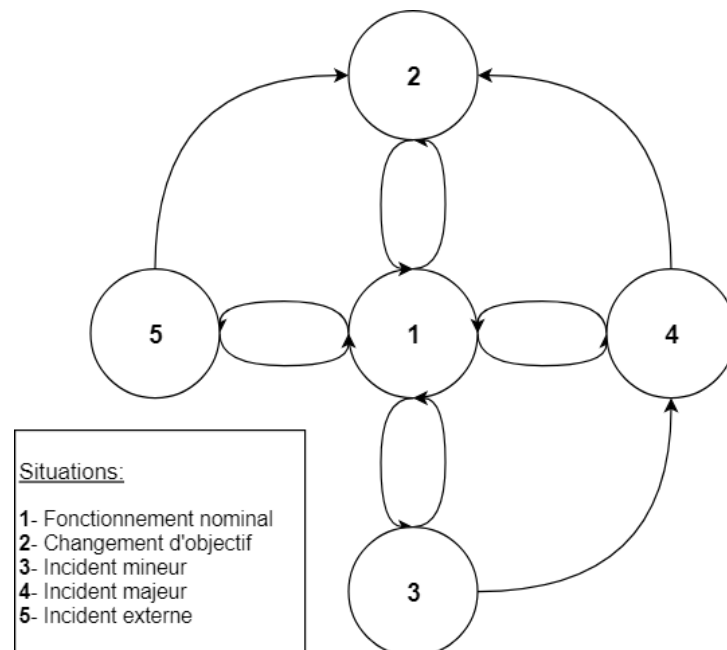


Figure 10 Transitions entre les différentes situations possibles au sein du système

Nous discutons tout d'abord de la situation 2, représentée Figure 11. Comme précisé dans les paragraphes précédents, cette situation survient lorsque l'objectif précédemment établi n'est plus valide. Le superviseur doit alors établir le nouvel état du système, puis le comparer aux états précédents afin d'établir le point de divergence. Deux « shunts » ont été identifiés dans le processus décisionnel et peuvent être comparés à des « raccourcis » empruntés lorsque la situation s'y prête. Par exemple, le premier shunt correspond au cas où une ressource du système n'est plus opérationnelle. Le superviseur peut chercher à la remplacer avant même d'analyser plus en détail la situation. Cependant cela implique, de la part du superviseur, une connaissance préalable des alternatives possibles. Le deuxième shunt correspond à la violation d'une contrainte de production (ex : énergétique, ...). L'agent peut alors appliquer une procédure connue pour avoir un impact sur la contrainte visé. Encore une fois, cela nécessite d'avoir une connaissance du système et de sa supervision afin d'être mis en pratique. Ces shunts peuvent se révéler intéressants pour arriver à un résultat plus rapidement et avec un effort moindre, mais cela nécessite une bonne connaissance du système et des règles qui le régissent. L'expérience du superviseur est donc décisive dans l'utilisation ou non de ces raccourcis.

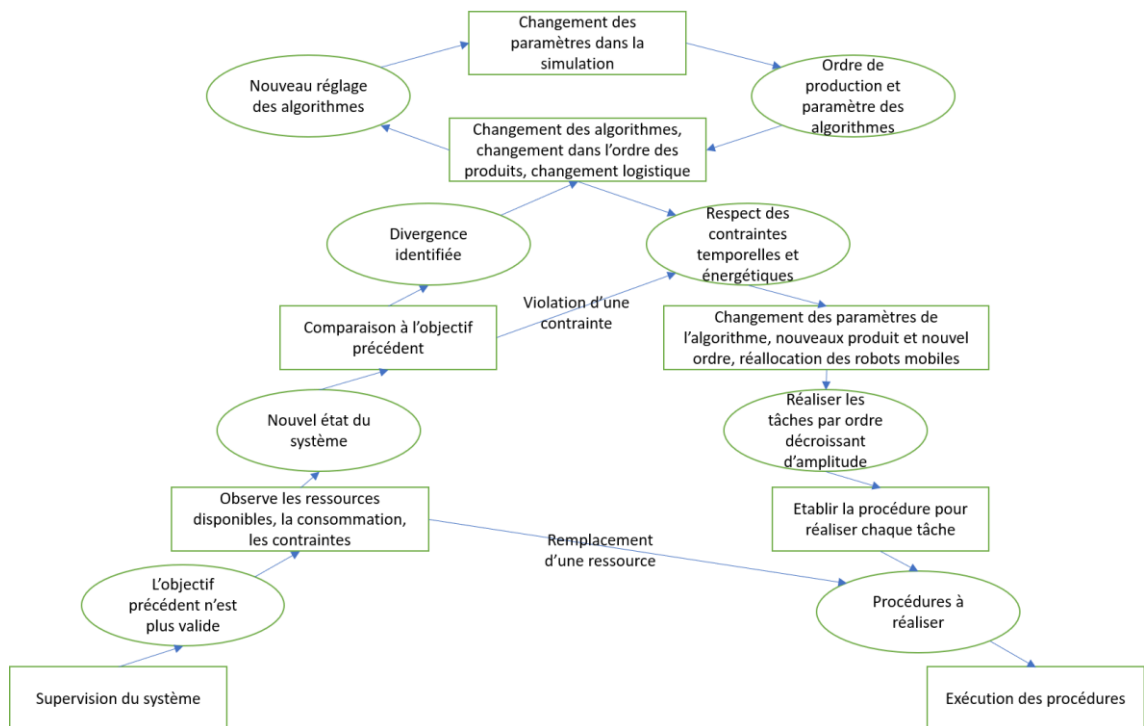


Figure 11 Échelle décisionnelle du changement d'objectif

La situation 3, soit l'incident mineur, est représentée sur la Figure 12. Celui survient lorsqu'un élément du système ne peut plus remplir pleinement sa fonction, mais sans provoquer d'effet majeur sur le système. Le superviseur observe tout d'abord la nature de

l'élément défaillant, afin d'identifier les compétences affectées ; la notion de compétence renvoie aux actions réalisables par le système et la modalité de réalisation desdites actions (temps de réalisation, etc.). Dans certains cas, il peut chercher à remplacer immédiatement l'élément affecté par un autre ayant des compétences équivalentes. Cela nécessite cependant une bonne connaissance des ressources à disposition. Sinon, une identification de l'impact sur le système doit être réalisée, afin d'établir dans quelle mesure le système sera affecté. Dans le cas où l'impact sur le système est élevé, l'opérateur pourra considérer la situation comme un incident majeur et évoluer vers une méthode de résolution adaptée. Dans le cas où l'impact estimé reste faible, il faut adapter l'ordre de production, ainsi que les paramètres de l'algorithme de l'acteur autonome, afin de ramener le système à un état stable et s'assurer que l'objectif fixé est toujours respecté. Si l'objectif ne peut être pleinement maintenu, le superviseur pourra entamer une phase de changement des objectifs une fois la situation régularisée. Il pourra être intéressant d'étudier les critères utilisés par un agent pour évaluer un incident comme étant mineur ou majeur.

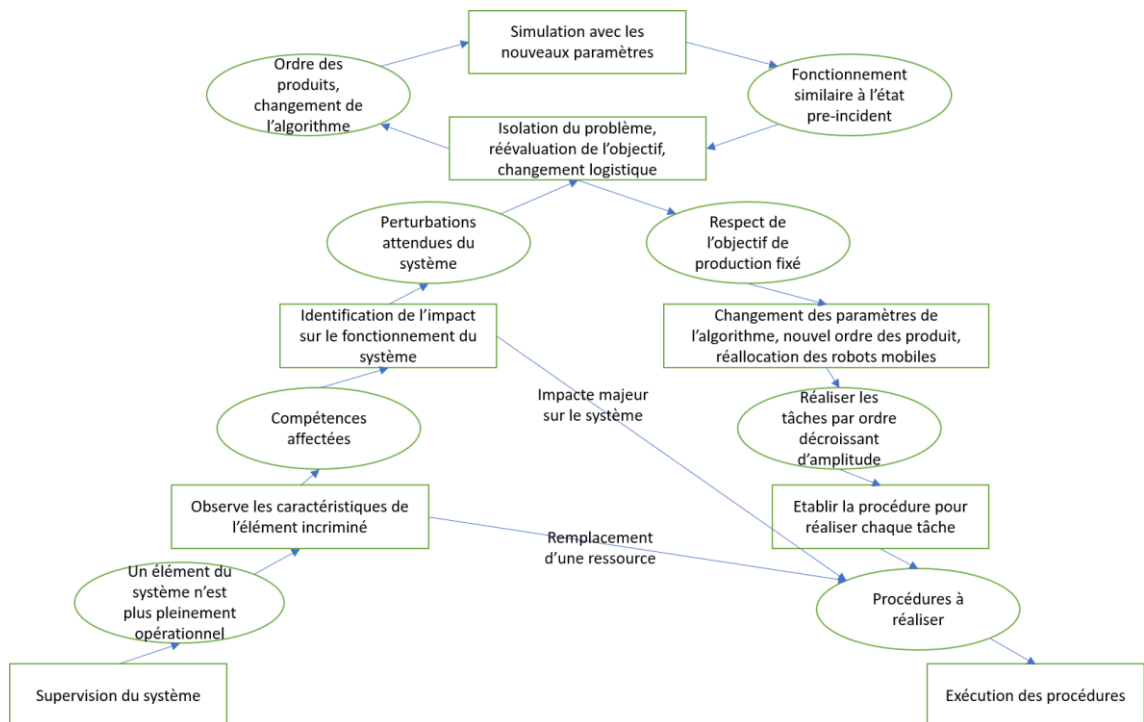


Figure 12 Échelle décisionnelle de l'incident mineur

La situation 4, correspondant à l'incident majeur est représenté sur la Figure 13. Il s'agit d'un problème pleinement déclaré et ayant un impact fort sur le fonctionnement du système, tel qu'un blocage où l'incapacité de traiter un produit. Il faut, en premier lieu, identifier les compétences perdues en fonction des éléments défaillants. A partir de là, il

est possible d'identifier quelles tâches sont encore réalisables et lesquelles ne peuvent l'être. Il est ensuite nécessaire de réévaluer complètement les objectifs à court terme, ainsi que de réorganiser le système. Le premier but est de ramener le système à un état fonctionnel, notamment en éliminant les tâches non-réalisables. Il peut également être nécessaire de rééquilibrer la charge de travail au sein du système afin d'éviter un sur-incident.

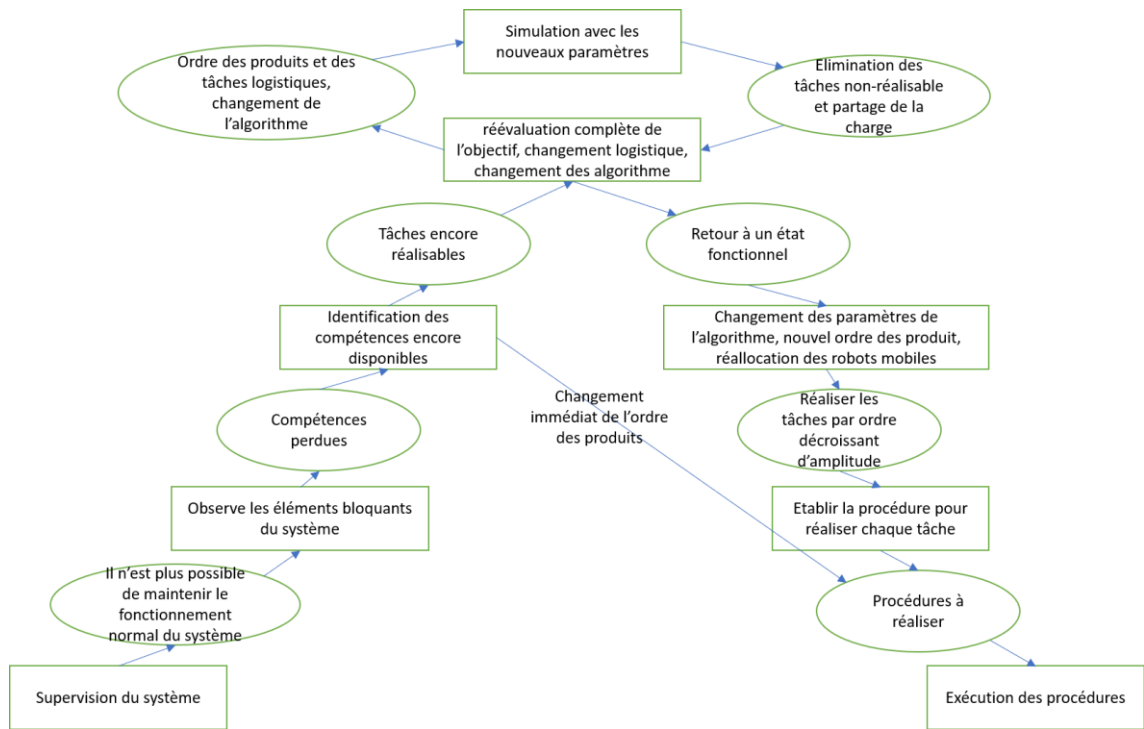


Figure 13 Échelle décisionnelle de l'incident majeur

La situation 5, relevant de l'incident externe, est représentée sur la Figure 14. Cette situation particulière est compliquée à gérer car la source est un élément externe au système. Il est typiquement impossible de prévoir l'occurrence d'un tel incident pour le superviseur du système et les possibilités de réponse sont limitées. Ainsi, à la déclaration de l'incident, il est nécessaire d'identifier la nature de l'incident, puis les risques encourus par le système. Suivant le type d'incident, trois possibilités existent :

- Le système ne court aucun risque
- Il est impossible d'agir sur l'incident ou de protéger le système
- Il est possible de protéger le système

Dans les deux premiers cas, la seule réponse possible pour le superviseur est de déclarer l'incident à l'autorité compétente, voire de mettre le système à l'arrêt si les règles de sécurité l'exigent. Dans le troisième cas, l'agent entame un changement dans la planification et dans le réglage des algorithmes des acteurs autonomes afin de limiter

l'impact à venir de l'incident sur le système. Il est important de noter que l'incident ayant lieu en dehors du système, le superviseur est le seul à pouvoir évaluer les perturbations à venir. Dans cette situation précise, l'ordre dans lequel les actions sont entreprises dépend en général du temps à disposition avant la perturbation et de l'ordre de propagation de celle-ci à travers le système (chaine causale). Si l'échéance est courte, il est commun de traiter en priorité les premiers éléments touchés par la perturbation.

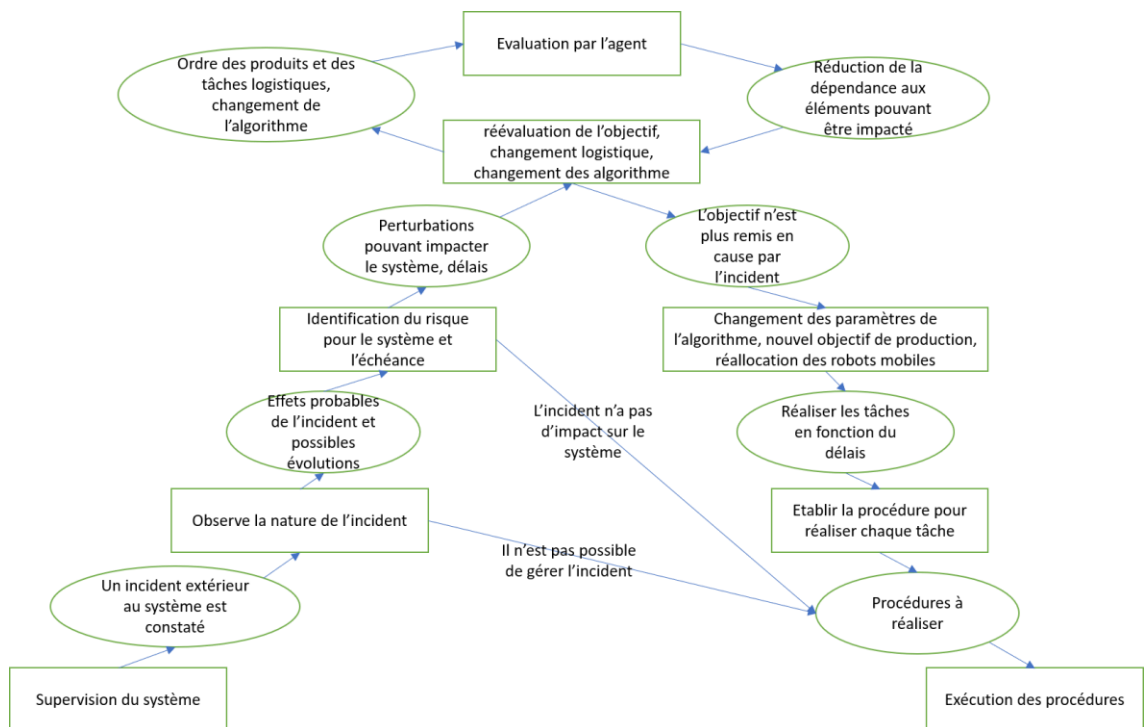


Figure 14 Échelle décisionnelle de l'incident externe

Cette décomposition des tâches nous permet d'établir les informations capitales à la prise de décision lors des différentes situations qu'il est possible de rencontrer. Il est ainsi possible d'éviter de hiérarchiser la présentation de l'information lors de la conception du système. De plus, cette analyse permet d'identifier les situations dans lesquelles le superviseur pourrait avoir besoin de moyens d'actions plus directs.

1.3 Analyse des stratégies (StrA)

Cette étape se concentre sur les différentes façons de réaliser chaque tâche, en s'appuyant notamment sur les conditions initiales et les contraintes appliquées. Cette étape bénéficie grandement de la contribution des utilisateurs expert du système, ceux-là même qui nous font défaut dans le cadre de l'industrie 4.0. Il a donc été nécessaire de faire des hypothèses à partir des informations disponibles, ce qui pose d'autant plus de problèmes qu'il s'agit de l'étape la moins développée du CWA. Cependant, il est possible de dérouler cette étape en interrogeant les participants lors de la phase expérimentale. Il est préférable dans ce cas d'interroger des participants ayant manipulé le système suffisamment longtemps pour être familiarisés avec son fonctionnement. Les résultats présentés ci-après ne sont qu'une traduction de nos hypothèses initiales.

Lors du **changement d'objectifs**, la temporalité a une incidence importante sur la stratégie choisie par un opérateur. A la suite d'une situation incidentelle, le superviseur subit une pression temporelle car il est nécessaire de ramener rapidement le système à un fonctionnement nominal et donc stable. Une stratégie classique, dans ce cas, est d'isoler le problème en évitant d'employer une ressource en défaut dans le plan de production. Ce n'est qu'une fois le système ramené à un état plus stable que le superviseur prend suffisamment de recul pour chercher à nouveau un fonctionnement optimal. Durant la période de pression temporelle, le superviseur cherchera principalement des moyens d'action ayant un impact rapide sur le système. Au contraire, lorsque le superviseur cherche à optimiser le système, il cherchera plus d'informations, des moyens de contrôle plus évolués et les moyens de comparer plusieurs approches.

Lors d'un **incident dans l'environnement** du système, deux approches sont possibles. Si le superviseur est débordé ou peu expérimenté, il peut choisir de se contenter de corriger les problèmes au fur et à mesure qu'ils se produisent, avec l'assistance du système. Le superviseur plus expérimenté peut chercher à établir la chaîne de causalité via laquelle l'incident pourrait atteindre le système, puis chercher à renforcer les points d'entrée. Pour cela il peut réaliser une maintenance préventive ou encore réallouer les ressources du système, voire même modifier le plan de production.

La construction du plan de production initial peut être abordée suivant plusieurs approches. Une stratégie prudente consiste à ne pas planifier à trop long terme et à observer dans un premier temps le comportement du système lorsque la production est lancée. Ensuite, des modifications mineures des paramètres sont réalisées pour adapter le système. Cette stratégie peut être préférée par les superviseurs ne connaissant pas encore

le système utilisé, car elle présente peu de risques. Une autre stratégie consiste à analyser les besoins et les ressources à disposition afin d'équilibrer le plan de production dans sa totalité, pour ensuite gérer les aléas lorsqu'ils se produisent. Cela provoque un coût « cognitif » supplémentaire du fait de la gestion de nombreux critères sur un laps de temps court, mais libère temporairement le superviseur d'une fonction de contrôle par la suite car il n'est plus nécessaire de changer le plan tant qu'aucune perturbation n'est observée ou que le plan est arrivé à son terme. Cette approche sera attendue principalement des superviseurs ayant une certaine compréhension du système.

Lors d'un **fonctionnement nominal**, le superviseur tend à être moins sollicité, il devient un observateur du système. Cependant, dans ses travaux, Endsley (2018) souligne qu'un superviseur laissé à la seule observation du système tend à perdre sa capacité à détecter un éventuel problème. De ce fait, il est intéressant de maintenir un certain niveau d'implication du superviseur dans le fonctionnement du système. Il ne faut cependant pas oublier qu'il s'agit également d'une situation propice pour que le superviseur récupère à la suite d'une situation particulière. Il convient donc d'adapter les tâches demandées afin d'équilibrer la récupération du superviseur et l'implication dans le système. L'optimisation du système semble une tâche propice au maintien de vigilance, car la contrainte temporelle de cette tâche reste faible. Cependant, avant d'initier cette optimisation, un superviseur expérimenté peut réaliser une projection des tendances pour s'assurer que la situation reste nominale suffisamment longtemps pour ne pas être surpris. Ces stratégies possibles constituent des indicateurs de certaines situations qui doivent être testées. Elles correspondent également à différents profils de superviseurs. Les avoir identifiées a priori peut être utile pour estimer si un superviseur fait preuve ou non de prudence.

1.4 Analyse de l'organisation sociale et de la coopération (SOCA)

Cette étape s'appuie sur les résultats précédents afin d'identifier comment le partage de tâche s'effectue entre les acteurs du système, mais également les relations entre les acteurs dans un cadre plus général. Pour cela, les schémas réalisés lors des étapes précédentes sont repris et chaque fonction est colorée en fonction des agents qui mettent en œuvre la fonction. Chaque agent dispose d'une couleur unique, ce qui permet d'identifier rapidement comment les tâches sont partagées, mais aussi les tâches dépendant fortement d'un agent spécifique. Tous les schémas présentés dans cette partie suivent le même code

couleur, à savoir orange pour les agents artificiels (le système) et bleu pour l'agent humain (superviseur).

Une première observation est la distribution des fonctions entre les agents (Figure 15). Les fonctions de supervision et les fonctions de prise d'informations sont partagées entre les agents artificiels et les agents humains. Le système tend à collecter beaucoup d'informations et à les transformer, à la fois pour son fonctionnement interne et pour fournir au superviseur une vue de l'état du système. Cependant le superviseur va également collecter de l'information lors de la supervision, notamment sur le comportement du système d'un point de vue global. Il s'agit d'un aspect important à maintenir, car le système d'informations peut subir des défaillances. Permettre au superviseur de collecter ses propres informations, par exemple sur la disponibilité du ravitaillement, permet une validation des informations. Le superviseur peut, par exemple, observer un obstacle gênant le ravitaillement des postes de travail avant que le système, via les robots mobiles, ne puisse en faire le rapport. Certains obstacles pourraient même ne pas être signalé par le système suivant leur nature, car les capteurs ont des limites techniques ; les capteurs visuels et/ou de distance sont par exemple très sensibles aux matériaux réfléchissants, produisant des données erronées. L'opérateur, via un retour vidéo par exemple, pourra constater un comportement du système suggérant un tel problème et intervenir en conséquence.

Une deuxième observation est relative à l'hégémonie du superviseur concernant la gestion des objectifs. Qu'il s'agisse de leur compréhension, de l'établissement d'une stratégie ou de la négociation et de la planification des objectifs, le superviseur humain est seul à décider. Cela peut s'expliquer par la vision large de l'être humain lors de l'établissement d'une stratégie. Le système peut difficilement évaluer certaines dimensions, telles que la sécurité ou l'adaptabilité, et de manière générale, ne peut pas intégrer des facteurs externes au système. L'humain reste le choix le plus judicieux dans ce domaine.

La troisième observation concerne le contrôle à proprement parler des entités du système de production. La scission s'effectue ici différemment : les fonctions liées au contrôle direct des entités sont majoritairement gérées par le système, car il s'agit de l'aspect purement fonctionnel du système. Par exemple, le contrôle des navettes contient le savoir-faire pour amener une navette d'un point A à un point B. Le superviseur s'implique plus dans le contrôle des robots mobiles et dans la gestion des produits, qui eux sont en lien avec ses objectifs de production. La fonction de gestion des produits s'appuiera sur le

contrôle des navettes afin de déplacer le produit dans le système, mais le superviseur n'a pas intérêt à interférer avec le fonctionnement d'une navette en elle-même. Concernant les fonctions de sélection de l'autonomie et l'adaptation de leurs algorithmes, il s'agit d'activités purement humaines car elles représentent l'autorité de l'humain sur le système et dépendent des objectifs connus du superviseur.

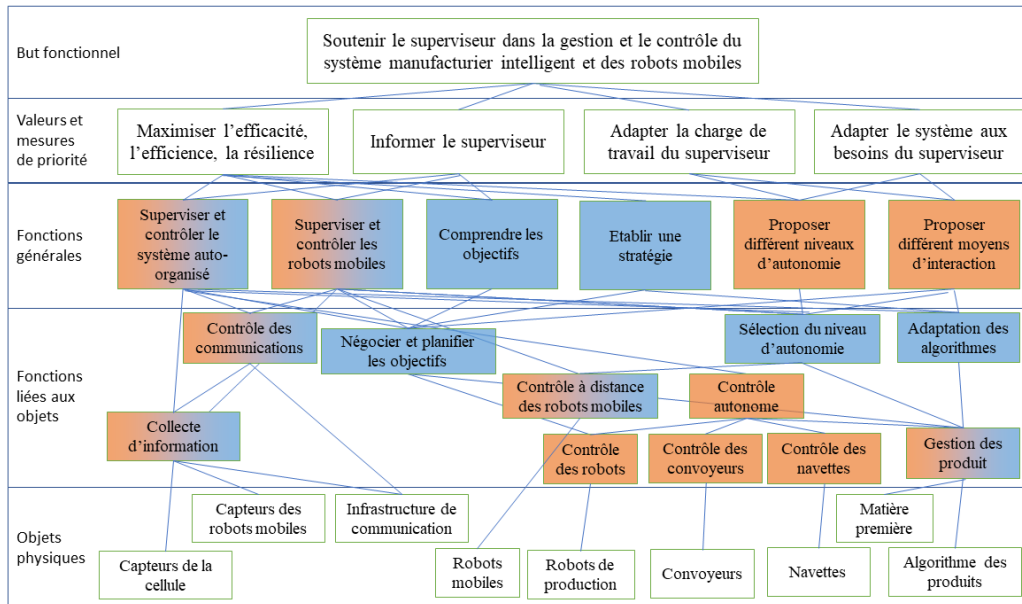


Figure 15 SOCA appliqué à la hiérarchie d'abstraction (AH) ; agents artificiels en orange, agents humains en bleu

Les échelles décisionnelles montrent plus de possibilités de partage de fonctions entre les agents car ces fonctions sont réutilisées dans la réalisation de plusieurs types de tâche. Lors d'un changement d'objectif (Figure 16), le système et le superviseur partagent plusieurs fonctions, notamment la prise d'information. Cependant, on observe aisément que la prise de décision (segment supérieur de l'échelle) et l'application de la décision (jambe droite de l'échelle) sont principalement du ressort du superviseur. Une exception persiste cependant avec l'évaluation des options (point le plus élevé de l'échelle), qui s'appuie fortement sur le système et la possibilité de simuler un changement. Sans la présence d'un simulateur, le superviseur peut difficilement prendre en compte les très nombreuses interactions possibles au sein du système. Il s'agit donc d'un élément clef dans la prise de décision.

Lors de la gestion d'un incident, qu'il soit mineur (Figure 17) ou majeur (Figure 18), la répartition des fonctions reste semblable à celle observée dans le cas d'un changement d'objectif. On observe toujours cette dépendance à la simulation du système lors du

processus décisionnel, ce qui en fait un point majeur de développement. Un changement est cependant observable lors de l'exécution des procédures (jambe droite, partie inférieure) qui peuvent également être réalisées par le système. Il s'agit là de la capacité d'auto-organisation du système en réponse à une perturbation. Ce point est très important, car si une réponse rapide du système est désirable pour le maintien des opérations, cette décision ne doit pas entrer en conflit avec celle du superviseur.

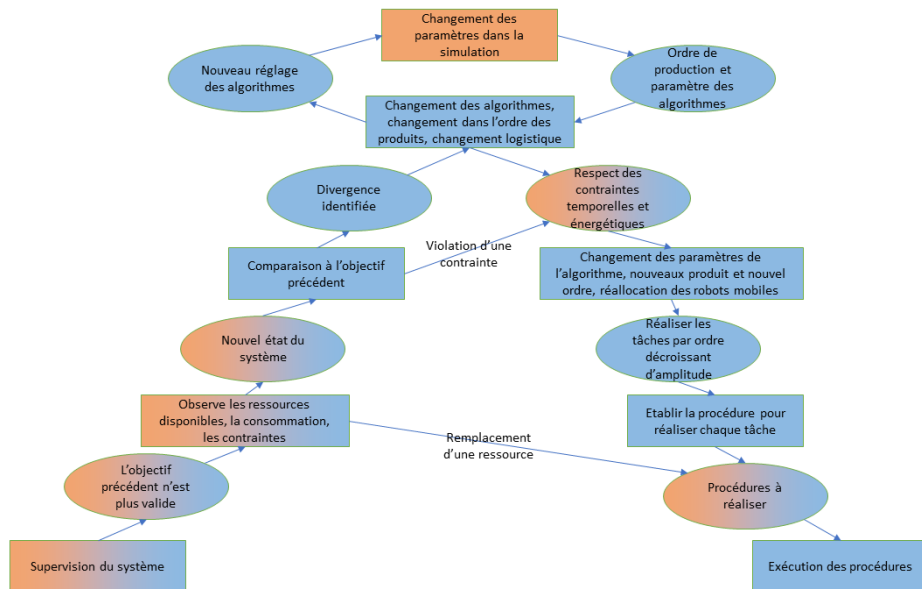


Figure 16 SOCA lors d'un changement d'objectif ; agents artificiels en orange, agents humains en bleu

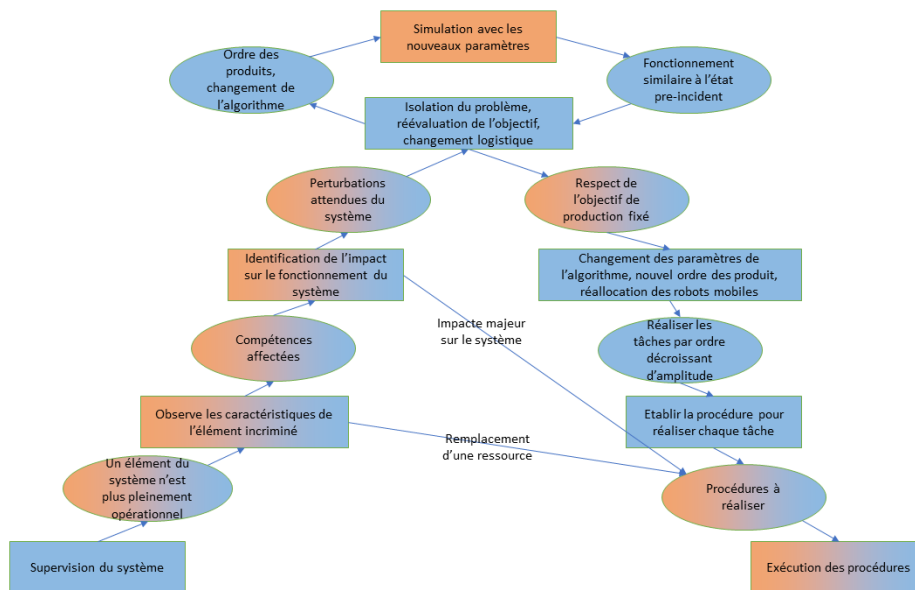


Figure 17 SOCA de la gestion d'incident mineur ; agents artificiels en orange, agents humains en bleu

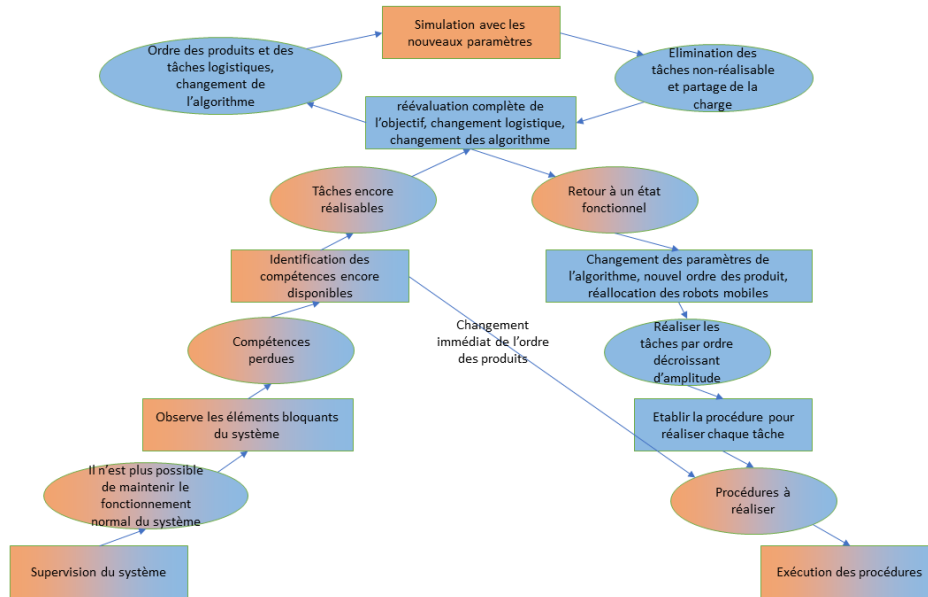


Figure 18 SOCA de la gestion d'incident majeur ; agents artificiels en orange, agents humains en bleu

L'application de la SOCA à la gestion d'un incident externe (Figure 19) révèle cependant une situation particulière : les fonctions sont presque entièrement réalisées par le superviseur. Il s'agit d'une situation à laquelle le système ne peut que partiellement contribuer, car celui-ci n'est pas conçu pour agir en dehors du cadre de la production. Ce n'est en aucun cas un défaut du système, mais simplement une situation ne relevant normalement pas du système. Un exemple extrême serait un incendie à proximité de la cellule de production. Le système ne peut pas réagir à la situation, ni même intégrer l'impact de cet événement sur la production, mais une décision doit tout de même être prise. Il s'agit là d'un rôle d'importance pour le superviseur, car seul l'humain peut faire face à une situation imprévue (voir chapitre 1). Suivant les cas, le système peut apporter une contribution lors de l'évaluation des options (élément supérieur de l'échelle) à condition que le superviseur réussisse à renseigner le système. Par exemple, si la voie permettant d'approvisionner une machine est obstruée, l'opérateur peut refuser au système l'utilisation de la machine lors de la simulation et ainsi simuler sa future indisponibilité. Cette situation montre l'importance de la présence d'un agent humain, disposant d'une vue plus large que le système et d'une autorité suffisante pour préparer le système à répondre à un problème qu'il ne perçoit pas.

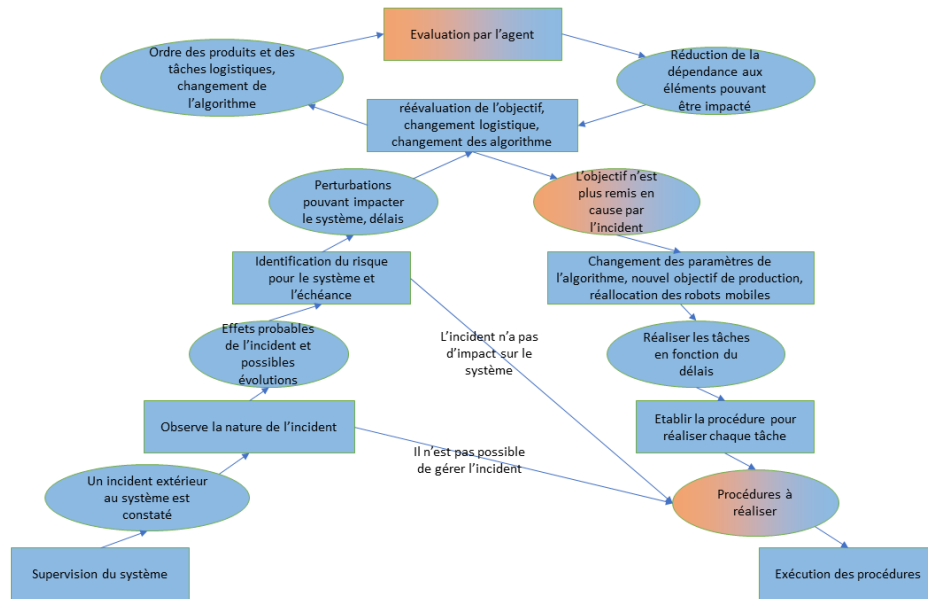


Figure 19 SOCA lors de la gestion d'un incident externe ; agents artificiels en orange, agents humains en bleu

1.5 Analyse des compétences des opérateurs (WCA)

Le WCA s'appuie sur le modèle SRK de Rasmussen (1983) pour identifier, pour chaque tâche réalisée, les modes de contrôle utilisés. Cela peut permettre de mettre en place un entraînement plus adapté des opérateurs humains. Dans notre cas, la formation des utilisateurs est compliquée, car cela nécessite du temps à la fois de l'équipe de recherche et des participants qui ne sont disponibles que pour un temps très limité.

Cependant une autre possibilité est d'adapter le système afin de susciter le passage à un autre mode de contrôle pour une même tâche. Elle peut être mise en œuvre dans le cadre d'activités ludiques qui peuvent aboutir à la construction de compétences exploitables lors de la supervision. Nous retrouvons cette idée dans les notions de « serious game » et de « gamification » utilisées à des fins pédagogiques (voir par exemple les travaux de Habib et al. (2018)).

2. Analyse des données obtenues

Chaque étape du CWA fournit des informations intéressantes pour améliorer le système, mais c'est en croisant toutes ces informations que cette méthode démontre tout son potentiel.

Par exemple, nous avons vu que la présence d'un système de simulation représente un point important pour le processus de décision du superviseur humain. Il est donc important de concevoir un simulateur intégrant tous les facteurs sur lesquels le superviseur peut agir.

Un autre point intéressant concerne le possible conflit entre les décisions du superviseur et celles du système. Le superviseur ayant la responsabilité du système, celui-ci doit garder l'autorité sur le système, et donc non seulement pouvoir vérifier les décisions prises par le système, mais également pouvoir s'y opposer. Dans le cas d'une opposition, cela signifie que le superviseur a connaissance d'au moins une meilleure alternative. Il est donc possible de remplacer la simple opposition par le choix d'une autre alternative. Cela offre la possibilité au système de participer à la décision du superviseur, en lui présentant à la fois sa décision actuelle et les alternatives possibles. Cela offrirait à l'opérateur une meilleure compréhension des contraintes sous lesquelles le système a pris la décision et améliorerait son processus décisionnel en éliminant les alternatives incompatibles.

Il faut également mettre à la disposition du superviseur un moyen indirect, et donc moins intrusif, d'interagir sur la prise de décision du système. En effet, il peut être intéressant de se contenter d'orienter les décisions en fonction des objectifs de production.

3. Conclusion

Suite à la présentation du contexte de l'étude dans le chapitre 2, à savoir la conception d'un atelier flexible manufacturier de production dont le pilotage et la supervision seraient assurés par un superviseur humain assisté d'outils d'aide à la décision, ce chapitre a appliqué la méthode CWA pour identifier les objectifs, les tâches et fonctions de chaque acteur impliqué dans le contrôle du système. Chaque étape de la méthode a ainsi contribué à progressivement découvrir les fonctions individuelles et les fonctions partagées de

chaque acteur, pour le superviseur humain, mais aussi pour les agents artificiels, qu'ils soient uniquement logiciels (aides à la décision ; partie cyber) et/ou physiques (robots). La réflexion menée par le biais de cette méthode a permis de dégager une organisation globale pour le pilotage et la supervision du système, en fonctionnement normal ou dégradé, tout en détaillant chaque fonction devant être implémentée. Ce travail d'analyse et de spécification est maintenant exploité dans le chapitre 4, par la mise en œuvre de l'ensemble des fonctions sur la plateforme expérimentale développée dans le cadre du projet HUMANISM.

CHAPITRE 4 : CONCEPTION D'UNE PLATEFORME EXPERIMENTALE : MICRO- MONDE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION HUMAIN- CYBER-PHYSIQUE

L'application du CWA au cas des systèmes industriels du futur, décrite dans le chapitre précédent, permet d'identifier plusieurs angles sous lesquels il serait possible d'améliorer ou de créer un système relevant de l'Industrie 4.0. Il est maintenant nécessaire d'avoir à disposition une plateforme permettant de mettre en œuvre nos propositions et surtout de vérifier nos hypothèses. Il s'agit d'une étape nécessaire mais néanmoins complexe. Ce chapitre a pour objet de présenter une telle plateforme. Nous débuterons ce chapitre par une discussion sur l'offre existante en recherche dans le développement de plateformes de validation des contributions scientifiques, et ce dans le domaine du pilotage des systèmes industriels du futur. Puis, nous présentons la plateforme que nous avons développée, cadre expérimental de nos travaux. Ce cadre expérimental et les résultats obtenus font l'objet du chapitre suivant.

1. Limites des plateformes de validation existantes

Il est très difficile de reproduire un système existant en l'état de nos réflexions ou, de façon générale, de trouver dans la communauté travaillant sur les systèmes industriels du futur et de leurs interactions avec l'humain, un environnement expérimental nous

permettant de tester nos hypothèses. Il est donc nécessaire de développer notre propre plateforme. Elle est une reproduction simplifiée d'une réalité industrielle, autorisant l'insertion de systèmes innovants et permettant d'opérer en toute sécurité pour les systèmes et surtout pour l'opérateur humain. Nous avons montré dans Berdal et al. (2020) que les plateformes actuelles sont fortement focalisées sur la validation d'un aspect spécifique, souvent uniquement technologique, en lien avec la spécificité de la recherche menée. Bien qu'offrant des détails intéressants quant aux dernières évolutions technologiques, elles ne permettent pas d'émuler ou simuler un système complet. En l'occurrence, notre plateforme se doit d'être centrée sur l'interaction avec l'opérateur. De plus, peu de travaux portent sur l'intégration de plusieurs types de technologie au sein d'une même plateforme de validation, ce qui est nécessaire pour étudier l'impact d'un système complet sur l'activité humaine.

La reproduction d'un système complet reste néanmoins un défi, mais l'application du CWA offre aussi dans ce contexte une aide précieuse. Les différentes étapes ont en effet pour avantage de détailler chaque aspect du système qu'il faut concevoir. Nous avons donc réexploité ces étapes afin de produire une plateforme aussi complète que possible, permettant de faire évoluer un opérateur dans un environnement 4.0 crédible et cohérent avec l'hypothèse que nous souhaitons tester. Notre hypothèse est, rappelons-le, *un modèle de pilotage intégrant l'humain construit sur la base du CWA permettrait de concevoir un système permettant à l'humain de contribuer efficacement au fonctionnement de systèmes industriels cyber-physiques, notamment dans le contexte incertain que constitue l'usine du futur* (chapitre 2). Les détails de la réalisation de notre plateforme construite dans le cadre du projet ANR HUMANISM, sont présentés dans la suite de ce chapitre.

2. La plateforme HUMANISM

La première étape de construction d'une plateforme consiste à la spécifier, tant d'un point de vue technologique que de celui relatif aux interactions humain-machine, sans oublier les besoins propres au contrôle d'une plateforme expérimentale (contrôle de scénario, enregistrements). Ces trois points sont détaillés dans les paragraphes suivants. Une fois les caractéristiques établies, la structure finale de la plateforme est présentée, ainsi que son implémentation.

2.1 Spécifications

2.1.1.1 Considérations initiales

Dans un premier temps, un aspect critique à traiter est la façon d'intégrer les nouvelles technologies au sein de la plateforme. Comme précisé ci-dessus et dans les chapitres précédents, la majorité des développements scientifiques réalisés dans le cadre de l'industrie 4.0 se concentre sur une technologie particulière et ne traite donc pas de l'interaction entre différentes technologies employées. Traiter de cette problématique constitue un domaine de développement à part entière. Dans le cadre de nos travaux, cela signifie principalement que la plateforme doit être en mesure d'accepter l'intégration de nouvelles technologies, sans causer de changement majeur ni dans son implémentation ni sa conception. Ce principe peut être considéré comme un facteur de flexibilité du système industriel émulé.

Un deuxième point important est celui des caractéristiques propres à une plateforme expérimentale. En effet, l'objectif d'une telle plateforme est d'apporter une preuve appuyant une hypothèse défendue dans des travaux. Si cet aspect paraît évident, il ne s'agit pas moins d'un aspect des plus critiques. Si la plateforme ne permettait pas d'observer ou de capter des informations importantes pour tester les hypothèses, alors sa raison d'être serait remise en cause. L'élément principal dans ce contexte est la notion de KPI, ou « Key Performance Indicator ». Il s'agit de quantifier toutes les caractéristiques d'une production et de son environnement qui permettent d'en évaluer la qualité au regard de divers objectifs, comme la consommation électrique ou encore le respect des délais. Pour cela le WDA apporte une aide importante via les « valeurs abstraites et mesures de priorités ». Ainsi les critères peuvent être regroupés selon deux groupes principaux : ceux portant sur l'efficacité et ceux portant sur l'efficience. Comme précisé dans le chapitre 3, l'efficience est un critère complexe qui peut varier fortement entre deux domaines d'application. Il est donc important d'être générique quant aux données collectables. Chacun de ces indicateurs doit être rigoureusement extrait et sauvegardé afin de mettre à l'épreuve les hypothèses posées.

Un autre élément à traiter dans ce contexte, qui prend de plus en plus d'importance dans notre communauté, est celui de la reproductibilité, qui est désormais un prérequis à la conception de toute plateforme. Il est donc nécessaire de pouvoir identifier et enregistrer toutes les données et paramètres en entrée et ceci, pour chaque sortie obtenue. Dans le cas contraire, la situation visée ne peut pas être reproduite et les résultats ne peuvent être

comparés. De plus, il est à la fois important de pouvoir générer différents scénarios pour couvrir les différents cas d'usage, mais également de pouvoir les reproduire fidèlement entre deux exécutions. Cependant, l'implication de l'être humain rend toute reproduction difficilement réalisable (à cause de la variabilité intra et inter individuelle). Pour pallier ce problème, il est important d'enregistrer chaque décision prise par un utilisateur ainsi que le contexte dans lequel elle est prise. En complément, il est intéressant de pouvoir enregistrer le comportement d'un utilisateur, tel que le regard ou encore les actions réalisées sur les interfaces (manipulation de la souris, ...). Ces enregistrements permettent, par exemple, d'identifier quelles informations un utilisateur a utilisées pour prendre une décision.

Quatrièmement, l'étendue des types d'activités humaines doit être pris en compte. Il faut notamment considérer les différents niveaux de prise de décision d'un opérateur humain, à savoir opérationnel, tactique et stratégique. Dans ce type d'application, un opérateur peut être amené à prendre des décisions liées à des activités de planification (stratégie), de replanification et ajustement (tactique) ou encore de contrôle/commande (opérationnel). La plateforme doit soutenir l'ensemble de ces décisions et des interactions afférentes. De plus, les systèmes conçus peuvent être en interaction avec plusieurs opérateurs susceptibles de travailler à des niveaux différents. Il existe donc potentiellement des interactions entre opérateurs à étudier, et donc à enregistrer, en plus des interactions avec le système. Un autre aspect important est de permettre aux opérateurs d'élaborer un modèle des acteurs artificiels du système. Cela signifie, dans notre cas, que les modèles comportementaux et de décision utilisés par les entités artificielles au sein du système doivent être transparents et prédictibles. Dans le cas contraire, ces entités apparaîtraient comme des « boîtes noires ». Les entités artificielles ainsi déployées se doivent d'être comprises et contrôlées par les concepteurs, les expérimentateurs et les opérateurs. Le système doit, en outre, prendre en compte toute décision d'un opérateur, notamment lorsqu'il change sa façon d'interagir en fonction de la situation. Cela peut aller d'un simple changement dans sa méthode de travail à un changement de tâche complet. Un système trop rigide vis-à-vis de cet aspect briderait une des caractéristiques intéressantes des opérateurs qu'est la flexibilité ou l'adaptabilité face à l'imprévu. Des informations complémentaires liées à l'état cognitif, physique ou encore émotionnel de l'opérateur doivent donc être collectées pour permettre une analyse a posteriori d'événements ou d'actions non anticipés. Parmi ces données, on peut citer les indicateurs renseignant sur le stress ressenti par un opérateur, sa charge mentale ou encore

sa conscience de la situation. Ces données sont importantes, au même titre que les KPI, pour évaluer l'impact d'un nouveau système sur l'activité d'un opérateur, ainsi que la perception et la compréhension qu'il en a. Cependant ces données ne peuvent pas être enregistrées depuis la plateforme. C'est pourquoi il est important d'utiliser des moyens de collecte de données complémentaires, tels que des questionnaires. Finalement, la plateforme doit permettre l'intégration de tout autre capteur qui pourrait être nécessaire.

Il existe également plusieurs caractéristiques liant à la fois l'aspect opérationnel d'exploitation de la plateforme et l'aspect humain de gestion des activités des opérateurs. L'une d'elles est la possibilité de provoquer intentionnellement des perturbations sur le déroulement du procédé par le biais de scénarios. Typiquement, une perturbation peut être provoquée par un événement interne, comme une panne machine (choix de ressources) ou la replanification (système de contrôle), ou externe comme la limite de consommation (choix de ressources) ou des nouveaux objectifs de production (système de contrôle). Il est à la fois nécessaire d'étudier la façon dont un système réagit à une perturbation, mais aussi comment l'opérateur gère ces perturbations inattendues, notamment lorsque le procédé de fabrication est fortement automatisé.

2.1.1.2 Les technologies de l'industrie 4.0

Une fois ces considérations initiales établies, il est possible de poursuivre avec le choix des technologies les plus pertinentes pour la réalisation du système et donc de la plateforme.

Les technologies de simulation présentent un intérêt certain pour un système sociotechnique aussi complexe que celui envisagé (cf. chapitres 1 et 3). Elles donnent à l'opérateur la possibilité d'accéder à la projection de l'état du système, construite à partir d'un état initial complété par des actions implémentées à tester. La comparaison des résultats de ces projections soutient l'opérateur dans le choix des meilleures options. Il existe typiquement deux grands types de simulation pouvant être développés (Berger et al. 2015):

- Une émulation complète du système qui permet d'abstraire des contraintes d'un système réel, notamment dans le cadre de tests ou de l'entraînement d'un opérateur, sans mettre en péril ni l'opérateur ni le système, ainsi que d'accélérer et de contrôler les essais et qui se comporte « comme » le système réel, jusqu'au volet temporel, avec les mêmes constantes de temps et de réaction.

- Une simulation ciblée d'une sous-partie du système, qui fournit une estimation assez grossière de l'évolution du système en fonction des paramètres en entrée. L'intérêt principal est de pouvoir évaluer rapidement plusieurs décisions pour sélectionner celle offrant les résultats les plus satisfaisants.

Rien n'interdit à une plateforme d'intégrer ces deux types de simulations, voire même de les hybrider avec des éléments physiques. Ce dernier point pourrait permettre d'étendre virtuellement des systèmes existants, ou de mettre en interactions des systèmes ne pouvant pas l'être en temps normal. A ce titre et pour les autres bénéfices cités, il s'agit d'un aspect que nous estimons important d'intégrer dans notre plateforme.

Afin de réaliser le système ainsi spécifié, nous nous sommes ainsi orientés vers l'utilisation d'un jumeau numérique (« digital twin » ou « DT ») et présentons la forme spécifiée dans la Figure 20.

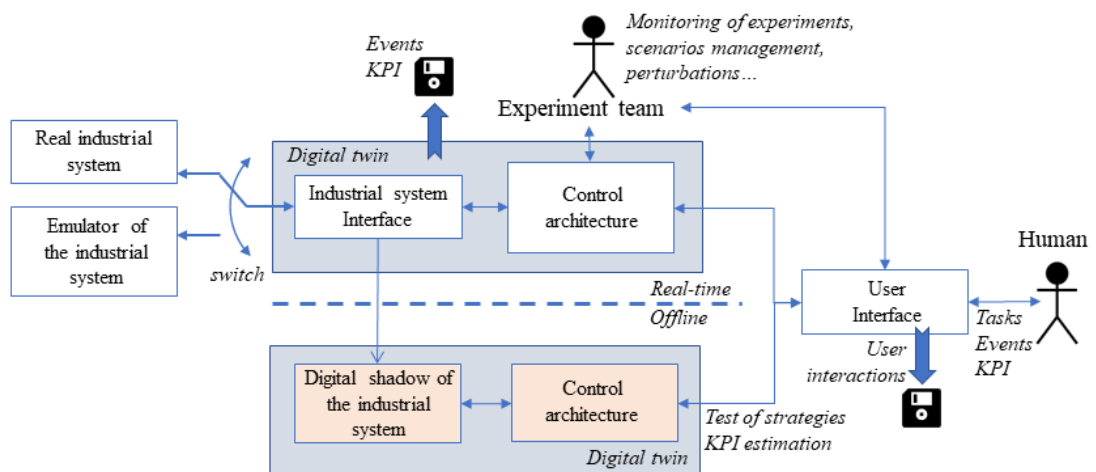


Figure 20 Architecture basée sur un jumeau numérique

Il existe de nombreuses définitions d'un DT. Negri et al. (2017) définissent le jumeau numérique comme « a virtual and computerized counterpart of a physical system that can be used to simulate it for various purposes, exploiting a real-time synchronization of the sensed data coming from the field ». Dans notre architecture, le jumeau numérique intègre également une « ombre numérique » (« digital shadow ») qui est un pendant du jumeau numérique ne pouvant interagir sur le système. Cette ombre numérique est utilisée comme instance de simulation du système, qu'il soit réel ou émulé. Une architecture de contrôle, copie de celle déployée sur le système, est utilisée conjointement avec l'ombre numérique afin de tester différentes stratégies avant de les appliquer. Le système est ainsi pourvu des capacités de simulation établies précédemment.

Dans cette configuration, l'idéal serait que l'alternance entre un système réel et son jumeau numérique soit « transparente » du point de vue technologique. Ainsi il serait possible de transiter d'un système réel à un système émulé, voire à un système hybride, sans que l'architecture de contrôle ne perçoive le changement. Ce principe, que nous avons adopté, offre une plus grande flexibilité d'un point de vue expérimental, à la fois sur la composition du système que sur les contraintes spécifiques à un contexte particulier. De plus, toujours dans un contexte expérimental, l'utilisation d'un jumeau numérique apporte plusieurs avantages. Il s'agit en effet d'un modèle numérique très précis du système étudié et qui est mis à jour en temps réel. Cela se révèle intéressant dans l'extraction de données (KPI, ...) et dans l'intégration de nouveaux éléments et/ou technologies, telles les architectures de contrôle. Il s'agit également d'une source de connaissance sur le système pour tout opérateur, à condition de fournir les bons moyens d'interactions avec le jumeau numérique.

Une autre technologie tend à accompagner la numérisation du système et vient compléter notre architecture : les technologies dites « cloud ». Il s'agit d'un domaine de développement gagnant en intérêt au sein du domaine industriel. En effet, la prise en compte de systèmes complets, parfois géographiquement séparés (globalisation des ressources), requière une infrastructure et architecture adaptées. Le « cloud » offre une infrastructure permettant à chaque acteur, quelle que soit sa position géographique, d'interagir avec chaque composant et acteur du système connecté et de centraliser l'ensemble des données expérimentales en vue d'une analyse statistique a posteriori (machine learning, etc.). Le « cloud » permet une interaction complète entre les systèmes et les acteurs, sans qu'un lien physique n'existe. Dans le cas de notre plateforme, cela signifie principalement d'adopter une architecture orientée réseau afin de permettre l'interconnexion des acteurs et potentiellement, des systèmes. Bien que nous ayons pris en compte ce volet « centralisation », la plateforme n'a pas été complètement spécifiée dans un objectif de post-traitement à base d'intelligence artificielle, ceci reste une perspective intéressante de développement.

Cependant, l'approche réseau que nous avons spécifiée dans le cadre de l'intégration horizontale, permet d'étendre le système à n'importe quel autre système supportant une connexion à travers un réseau commun (cf. chapitre 1). Le système manufacturier devenant alors une partie d'un plus grand ensemble, il devient possible d'étudier l'impact de l'environnement sur le système. Par exemple, il devient possible de coupler la

production avec la logistique de distribution, car cette dernière conditionne fortement le bon fonctionnement de la production. Il faut cependant s'assurer que le jumeau numérique est en mesure d'interagir avec d'autres systèmes complexes ne relevant pas de la production.

2.2 Implémentation

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons principalement à la supervision d'un système de production complété par un système de logistique d'approvisionnement par un opérateur, qui agit aux niveaux tactique et opérationnel. Dans le but de réduire la complexité du contrôle de ces systèmes, seules trois perturbations et deux KPI principaux sont prévus initialement :

- La panne d'une ressource, dans notre cas une machine (perturbation) ;
- Le changement de la limite de consommation (perturbation) ;
- L'arrivée d'une commande urgente (perturbation) ;
- La réalisation des commandes (KPI) ;
- La consommation d'énergie globale (KPI).

Afin de mettre en œuvre ces spécifications, nous avons développé une plateforme de manière intégrative, en nous inspirant et en ré-investissant deux plateformes existantes.

La première est une cellule de production flexible du réseau S.MART sur laquelle sont basés de nombreux travaux (Trentesaux et al. 2013; Pach et al. 2014; Barbosa et al. 2015; Berger et al. 2015). Dans le cadre de ces travaux, un simulateur et un émulateur ont été produits sur le modèle de la cellule S.MART et développés au sein du LAMIH. Le simulateur a lui-même été réutilisé plus tard dans le projet de benchmark « Bench4Star ». Il s'agit d'une plateforme utilisant le principe d'entités autonomes couplé à des navettes autonomes (guidées sur rail) et exploitant les principes de champs de potentiel et de produits intelligents pour ordonnancer de manière purement réactive la production (Pach et al. 2014). Parce que le simulateur est un système numérique, il est possible d'altérer sa référence de temps afin de changer la vitesse d'évolution du système simulé. Dans le cas d'un fonctionnement en temps réel, la fréquence de la référence de temps est adaptée de façon à ce qu'un utilisateur perçoive une vitesse d'exécution égale au système réel émulé. Il est cependant possible d'obtenir des résultats plus rapidement en augmentant la fréquence de la référence de temps, ce qui accélère la simulation. Si ce principe est utilisé sur une nouvelle instance du simulateur initialisée avec l'état actuel du système, il est alors possible de réaliser une projection de l'état futur du système. Des modifications de

paramètres pendant la simulation ne sont cependant pas envisageables car elles risqueraient d'affecter la cohérence des résultats. Il est également possible de réaliser un « digital commissioning », il s'agit également d'une simulation mais en modifiant les paramètres initiaux tels que des règles de contrôle du système. Notre contexte est propice à l'évaluation de cette approche car la compréhension et le contrôle par l'utilisation des champs de potentiel sont complexes pour un opérateur non averti.

Cette première plateforme a été exploitée lors de la réalisation du jumeau numérique et de l'ombre numérique associée. Plus précisément, il s'agit de l'émulateur Arezzo qui a été adapté afin d'avoir un modèle précis de la cellule flexible S.MART de Valenciennes. Le jumeau numérique ainsi créé possède à la fois toutes les informations sur la cellule S.MART mais aussi le moyen de la contrôler. Le contrôle est réalisé à l'aide de champs de potentiel, permettant à chaque navette du système de prendre une décision de manière autonome. De ce fait, notre jumeau numérique est déjà lié à plusieurs autres technologies de l'industrie 4.0.

Dans le cadre de nos travaux, la partie opérationnelle de la cellule de production est mise en œuvre par l'émulateur Arezzo. Comme introduit auparavant, le bénéfice principal est de pouvoir s'affranchir des contraintes d'un système physique (taille, perturbations involontaires, ...) pour réaliser nos expérimentations ; il sera toutefois possible de consolider nos résultats en utilisant un système physique. Il est à noter que, puisque Arezzo est un émulateur, son comportement est très proche de celui de la cellule de production. Il émule en temps réel les composants opérationnels pour lesquels chaque ordre et commande bas niveau doivent être envoyés à travers le réseau pour observer le moindre changement.

La seconde plateforme que nous avons intégrée est issue du projet SUCRÉ dans lequel une flotte de robots mobiles opère de façon autonome ou guidée dans le contexte des opérations de secours. L'étude était centrée sur la coopération Humain-Machine via une analyse du système et une adaptation des niveaux d'autonomie (Habib et al. 2017b, 2018). Cette flotte de robots peut donc être considérée comme des véhicules à guidage autonome (AGV) autorisant un mode de contrôle à trois niveaux, sélectionné à la discrétion de l'opérateur (téléopéré, semi-autonome, autonome). Un flux vidéo en provenance des AGV permet à l'opérateur de surveiller l'environnement et de suivre les robots indépendamment de l'environnement.

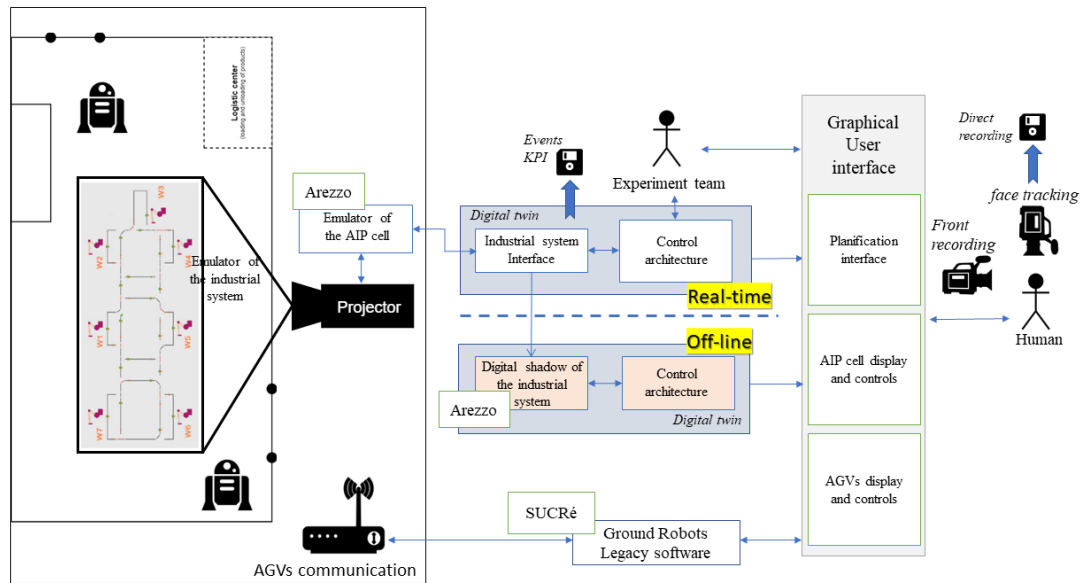


Figure 21 Schéma de l'architecture intégrée de la plateforme HUMANISM basée sur les deux plateformes Arezzo S.smart et SUCRÉ

Le système résultant est un « micro-monde » (Hoyles et al. 2002) (voir Figure 21), qui a été défini comme une hybridation entre l'émulateur Arezzo de la cellule S.MART utilisé en temps réel et des entités réelles, ici les robots de la plateforme SUCRÉ. Dans cette configuration, les robots sont utilisés comme véhicules à guidage autonome (AGV) et ont pour objectif de réapprovisionner virtuellement les robots de la cellule S.MART. Nous sommes donc dans une configuration où monde réel et virtuel sont fusionnés. Afin de créer un lien entre les AGV (physiques) et les robots de la cellule (virtuels), nous utilisons une vidéo projection de la cellule S.MART afin de lui donner un aspect physique (Figure 22). Afin de compléter ce rendu physique, une structure en bois, détectable par les robots, et avec des dimensions proportionnelles à la cellule de production réelle a été réalisée. Le volume de cette structure aide l'opérateur à visualiser l'espace occupé par la cellule de production et les contraintes physiques associées pour les robots. La projection lui offre une visualisation de l'état de la cellule et des trajectoires possibles pour les robots. Ainsi, il est possible d'offrir à l'opérateur un retour vidéo des opérations telles qu'il « pourrait » l'avoir avec une vue d'avion d'une cellule de production réelle.

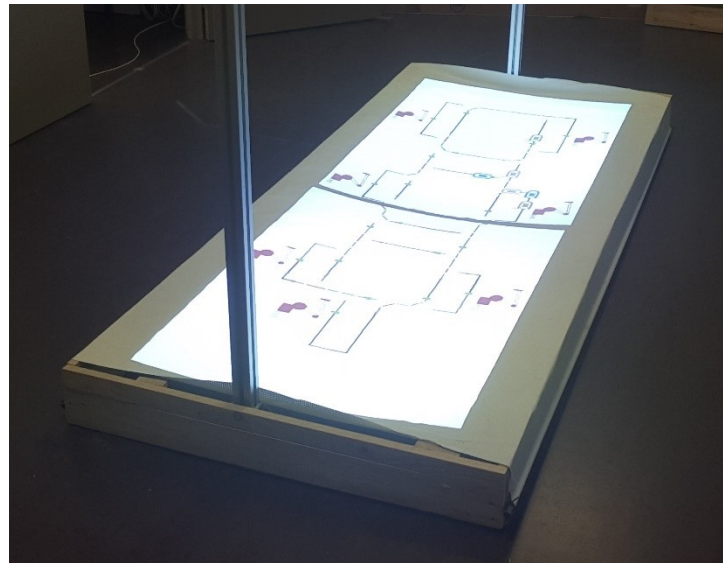


Figure 22 Reconstruction physique de la cellule S.MART

La Figure 23 décrit l'implémentation technique globale de la plateforme, fonctionnant sur une ou deux machines suivant les organisations testées. Le programme de contrôle des AGV est une application héritée du projet SUCRÉ, réalisée en C++, et n'ayant subi qu'une greffe permettant un contrôle distant. L'équipe en charge de l'expérimentation fait le lien entre l'opérateur et les AGV, afin de s'assurer de la bonne position physique des AGV avant d'autoriser les commandes, telles que le chargement ou le déchargement de produits. L'émulateur Arezzo est quant à lui développé en NetLOGO et interfacé à l'aide de Java. De ce fait, toutes les données et interactions sont informatisées. Cela permet notamment à un serveur, fonctionnant de pair avec la plateforme, d'exporter une partie de l'interaction sous forme de page internet. Ainsi, la planification de la production et de la logistique sont réalisées via un navigateur internet (cette page est décrite dans les paragraphes suivants). Le serveur envoie alors uniquement des mises à jour sous la forme de données brutes, laissant leur transformation et exploitation à la charge du client potentiellement distant. Un des avantages de cette architecture est que les opérateurs de la plateforme ne sont pas liés à la position géographique de celle-ci et que n'importe quel appareil pouvant se connecter au réseau peut être utilisé. Le coût de traitement des données brutes est déporté du serveur vers les clients, laissant plus de ressources pour d'autres applications. De plus, il est possible de mettre en place de nouvelles interfaces et de nouveaux moyens d'interactions sans impacter les travaux existants. Cependant, dans notre cas, seule l'équipe d'expérimentation a réellement un accès distant complet à la plateforme avec la possibilité d'interagir avec la plupart des entités. Cette architecture, permettant l'utilisation du réseau, reproduit les capacités d'une plateforme cloud, bien

que cela soit limité dans notre cas d'utilisation. De plus, la communication est établie à l'aide de protocoles standards et embarque à l'initialisation une liste des fonctionnalités disponibles. Il est donc possible d'insérer aisément de nouveaux éléments et de nouvelles fonctions dans la plateforme.

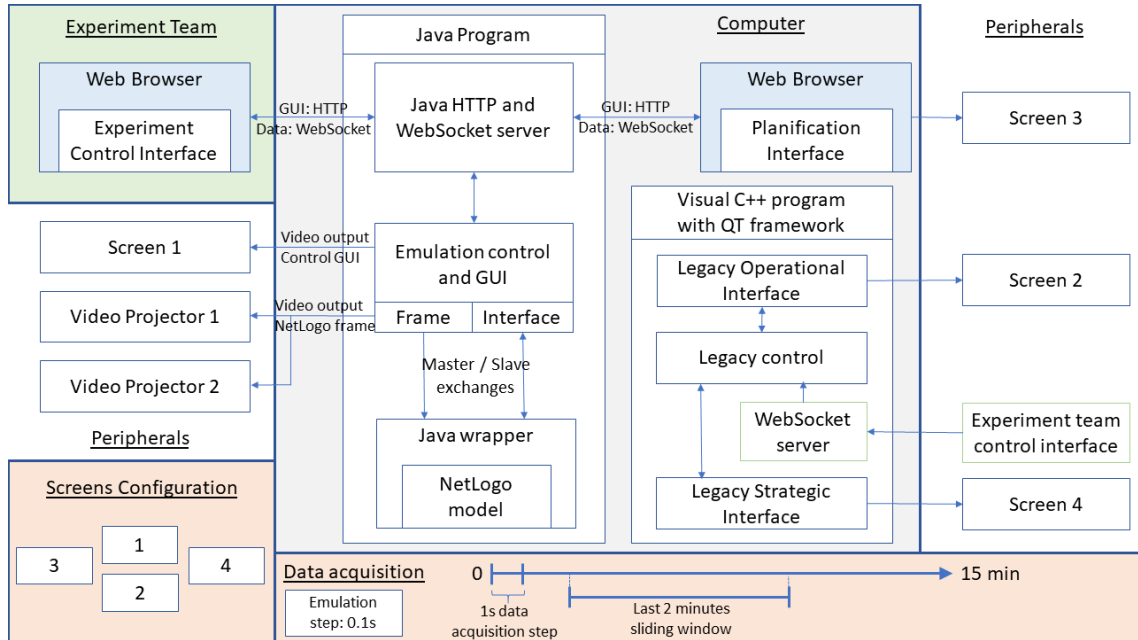


Figure 23 Schéma de l'implémentation technique de la plateforme

L'interface utilisateur étant relativement indépendante du jumeau numérique, l'équipe d'expérimentation n'a pas besoin de modifier le jumeau numérique à moins qu'une nouvelle fonction spécifique ait besoin d'être intégrée. Cela tend à différencier les besoins expérimentaux et ceux de la plateforme, prévenant la création de nouvelles versions de la plateforme pour chaque nouveau projet de recherche. Le partage des travaux entre équipes de recherche devrait en être facilité, de même que la reproductibilité des expérimentations, ainsi que le développement de la plateforme.

Afin de compléter les KPI, l'enregistrement des données individuelles de chaque robot de production, à savoir la consommation et le temps d'activité, est réalisé. Ces données sont consolidées par la sauvegarde d'un historique des événements notables à travers le système (ex : panne machine). En complément, des données objectives liées à l'opérateur sont collectées. Chaque action réalisée par l'opérateur résulte en une entrée dans les logs pour l'élément avec lequel l'interaction a eu lieu, le message envoyé, ainsi que l'action implémentée de façon à pouvoir retracer la chaîne des événements. Pour compléter le tout, plusieurs caméras disposées avec des angles différents permettent de reconstruire la situation a posteriori.

Grâce à l'intégration verticale de la plateforme, et donc de sa modularité, il est aisé de mettre en place l'interaction du système avec l'humain. Chaque partie de la plateforme peut coopérer avec un opérateur via des ensembles de fonctions et de données à disposition, qu'il s'agisse du niveau opérationnel, tactique ou stratégique. Dans notre cas de figure, l'opérateur est en charge à la fois de la production et de la logistique et opère principalement aux niveaux tactique et opérationnel. Afin de réaliser sa tâche, l'opérateur a à sa disposition plusieurs interfaces et outils qui sont détaillés dans la partie suivante.

3. Interfaces et systèmes d'aide à la décision

L'opérateur peut interagir avec la totalité du système grâce aux développements réalisés. Cependant, il est nécessaire de disposer des interfaces et des contrôles adaptés. C'est à cette étape que les éléments relevés lors du CWA ont le plus d'intérêt.

Nous commençons par l'interface principale, qui est l'interface de production (Figure 24). Il est possible d'observer à gauche une reproduction de la cellule de production, qui est mise-à-jour en temps réel pour fournir à l'opérateur une vue globale de la production. Cette vue globale est complétée par des graphiques s'appuyant sur les valeurs identifiées lors du WDA, ainsi que sur les informations exploitées dans les échelles de décision. Ainsi, chaque machine se voit associer quatre graphiques reprenant les valeurs principales à exploiter :

- L'efficacité (bleu) comptabilise le nombre d'opérations réalisées dans une fenêtre glissante de 2 minutes.
- L'efficience (rouge) comptabilise l'énergie consommée par les opérations dans une fenêtre glissante de 2 minutes.
- Le taux d'activité (actuellement gris mais évoluant) complète l'efficacité en évaluant le pourcentage de temps passé dans chaque état (opération, pause, panne) dans une fenêtre glissante de 2 minutes.
- La résilience (orange) correspond au volume de matière première restant sur la machine. Dans notre cas, il s'agit du seul critère entrant dans cette catégorie.

A gauche des graphiques, un curseur permet à l'opérateur de changer le réglage des champs de potentiel de façon à agir indirectement sur le système, en influant sur l'algorithme décisionnel des navettes. Il s'agit d'un facteur d'amplitude pour les champs

de potentiel, que l'opérateur augmente ou baisse s'il souhaite que les navettes prennent plus en compte ou ignorent le robot de production concerné.

En complément, les graphiques au centre représentent la consommation instantanée du système complet (milieu) et la consommation cumulée depuis le début des opérations (bas). La consommation instantanée sert à évaluer le respect des contraintes de consommation totale dans un domaine, en se maintenant sous une limite imposée (barre rouge). La consommation totale cumulée sert d'indicateur aux participants pour juger de leur performance dans le contrôle du système. Les deux graphiques de droite correspondent aux mêmes valeurs mais sont fournis par le simulateur, donc en avance sur les graphiques du centre. Le simulateur permet donc de tester différents réglages. En effet, en complément du graphique de consommation instantanée, le simulateur fournit à l'opérateur un indicateur coloré dans le cas d'une consommation ne respectant pas la contrainte énergétique. Cet indicateur, sous la forme d'histogramme, présente à l'opérateur les robots de production mis en cause et leur consommation au moment de la surconsommation. Il est possible de lancer une simulation d'un simple clic sur le bouton associé au-dessus des graphiques, un autre bouton adjacent permettant de copier le réglage des champs de potentiel actuels au besoin. Il est également possible pour l'opérateur de changer le réglage des champs de potentiel avant de lancer la simulation à l'aide des curseurs situés en dessous des boutons.

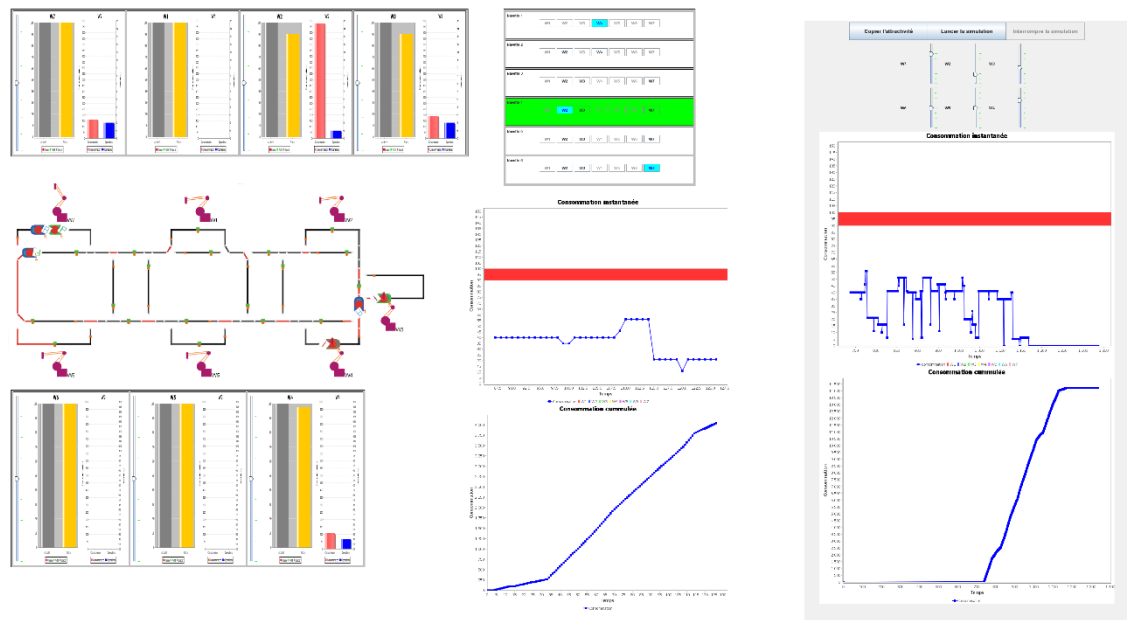


Figure 24 Interface de production

Le tableau en haut au centre est dédié à la surveillance et au contrôle direct des navettes. Chaque navette communique à l'opérateur à la fois l'opération en cours (nécessaire au produit transporté), la destination actuelle de la navette (le robot de production visé) et les alternatives possibles (autres opérations et robots de production possibles). Ainsi, s'il le souhaite, l'opérateur peut forcer une navette vers une destination en cliquant sur une des alternatives. La décision de l'opérateur est alors irrévocable à moins qu'il soit impossible de l'exécuter pour des raisons opérationnelles (ex : aucun aiguillage entre la précédente destination et la navette). Une fois l'ordre réalisé, la navette reprend son fonctionnement autonome. Afin d'aider l'opérateur à identifier chaque navette, le survol des contrôles d'une navette avec la souris illumine en vert à la fois les contrôles et la navette associée.



Figure 25 Interface de planification

L'interface de planification (Figure 25) permet à la fois de planifier la production (droite) et la logistique d'approvisionnement (gauche). La logistique fonctionne avec un système de cartes, qui correspondent chacune à une tâche réalisable. L'opérateur peut les planifier dans la colonne de droite en faisant un glissé/déplacé, mais une seule tâche par AGV peut être active en même temps. Lorsqu'il valide une tâche à l'aide du bouton fourni sur chaque carte, l'équipe d'expérimentation reçoit une notification pour valider ou invalider la bonne exécution de la tâche par l'AGV. En cas de validation, l'AGV entame l'étape suivante de sa tâche. En cas d'invalidation, l'opérateur reçoit une alerte sous la forme de

flash rouge sur la carte et doit effectuer une correction manuelle de l'AGV à l'aide des contrôles développés à cet effet.

La planification de la production présente en premier lieu les produits à réaliser, le volume demandé et les opérations qui doivent être réalisées (en haut). L'ajout d'un produit à la file d'attente de la cellule de production se fait par clic sur le bouton « fabriquer ». Il s'agit d'une file d'attente en FIFO (« first in, first out ») ré-ordonnançable par l'opérateur (flèche bleu). Cependant, le système vient charger automatiquement les produits sur les navettes dès que possible, ce qui peut générer des conflits entre l'opérateur et le système. Pour y remédier, l'opérateur a à sa disposition un bouton « planifier » lui permettant de bloquer le chargement des produits sur les navettes le temps de changer l'ordre de la file. Il s'agit d'un principe similaire à un sémaphore permettant de sélectionner l'acteur ayant le droit d'intervenir sur la file d'attente. Cependant, l'opérateur risque de bloquer tout le système s'il oublie de libérer la file, un système d'alerte est donc programmé si le curseur de la souris vient à quitter la zone de planification. Tout produit chargé sur une navette est transféré de la file d'attente à la zone de tâches en cours (en bas), et tout produit fini est transféré de la zone de tâches en cours à la zone de stockage (droite). Cela permet à l'opérateur de rester conscient de la progression de la production, en plus de voir le volume de produits achevés à côté du volume demandé (en haut).

Le graphique au centre de la planification de la production est un système d'aide développé à l'aide du CWA, permettant notamment de visualiser le lien entre la tâche de gestion des ressources et celle de gestion de la production. Ces deux tâches sont en effet fortement liées (voir chapitre 1) et l'absence de corrélation entre les deux pourrait être source d'erreur. Le graphique a pour objectif de faire le lien entre les capacités du système et ce qui est utilisé lors de la production des produits ; l'idée est de représenter les ressources à disposition sous la forme de cadres colorés, ressources qui pourraient évoluer en même temps que le système subit des évolutions. Chaque produit planifié (bleu) ou chargé (rouge) sur le système serait alors représenté sous la forme d'une brique venant occuper l'espace associé aux ressources qu'il consommera. Cela permet d'identifier la distribution de la charge à travers le système et les possibles contraintes de production (goulets). De plus, la représentation sous la forme de volume permet une compréhension rapide de la situation et l'identification des « débordements » correspondant à une surcharge des ressources.

Le développement de cette fonctionnalité est prévu en trois étapes séquentielles, dans l'ordre suivant :

- Une analyse « statique » des compétences disponibles permet de voir les compétences consommées à travers tout le système.
- Une mise à jour en temps réel permet de retirer les ressources indisponibles et de retirer les briques des opérations déjà réalisées.
- Une exploitation plus intense de la simulation permet d'afficher la distribution des briques non plus par compétences uniquement mais par robot de production également.

Étant donné le temps requis pour achever une plateforme remplissant nos objectifs, seule une partie de la deuxième étape a pu être réalisée (i.e. la mise à jour des cadres). Cependant, une grande majorité des spécifications présentées lors de ce chapitre ont été implémentées. Toutes les grandes fonctions attendues du système sont ainsi opérationnelles et ont fourni une plateforme innovante dans le domaine des systèmes industriels du futur, adaptée à la coopération avec un opérateur humain. Elle est de surcroît modulaire, à la fois en équipement et en installation. La flexibilité du système développé a permis de mettre en œuvre de nombreuses expérimentations, comme cela sera expliqué dans le chapitre suivant. Ouverte à la communauté et modulaire, nous estimons qu'il est possible de réexploiter notre plateforme HUMANISM dans de nombreux travaux.

CHAPITRE 5 :

EXPERIMENTATIONS

Ce chapitre présente les deux expérimentations réalisées de façon à vérifier l'hypothèse introduite dans le chapitre 2, à savoir « un modèle de pilotage intégrant l'humain construit sur la base du CWA permettrait de concevoir un système permettant à l'humain de contribuer efficacement au fonctionnement de systèmes industriels cyber-physiques, notamment dans le contexte incertain que constitue l'usine du futur ». Ces deux expérimentations ont été élaborées en se basant sur les résultats extraits du CWA, résultats appliqués par le biais du développement de la plateforme décrite dans le chapitre précédent. Ces deux expérimentations s'appuient sur cette même plateforme mais en l'exploitant de deux façons différentes. L'organisation de ces deux expérimentations, ainsi que les différences qui les caractérisent, est présentée dans les premières sections de ce chapitre. Les résultats obtenus sont détaillés, puis discutés pour chaque organisation. Nous concluons avec une synthèse des résultats issus des deux expérimentations et une présentation des connaissances que nous en avons produites.

1. Première expérimentation

La première expérimentation se place dans un contexte d'utilisation du système industriel cyber-physique par des utilisateurs novices. Au-delà de l'appréhension initiale liée au fait d'utiliser un prototype expérimental de recherche, une procédure a été définie incluant des étapes telles que la présentation de la plateforme aux utilisateurs et le contrôle des possibles comportements inattendus des utilisateurs par les expérimentateurs. Cette procédure, ainsi que toutes les informations organisationnelles concernant cette expérimentation, sont présentées dans la partie suivante. Les résultats obtenus seront présentés et discutés avant de décrire la seconde expérimentation.

1.1 Organisation

La première expérimentation a rassemblé un total de 22 participants. Tous sont étudiants et âgés de vingt à vingt-trois ans (moyenne : 20,9 ; déviation standard : 0,85), et proviennent de deux cursus différents. Huit participants proviennent d'un cursus en robotique et les quatorze autres d'un cursus en ingénierie des systèmes de supervision. Il est à noter que seulement deux femmes (une dans chaque cursus) composent notre groupe de participants. Pour les besoins de l'expérimentation, les participants sont répartis en deux groupes de même effectif pour chacune des deux conditions expérimentales, à savoir avec et sans système d'aide, la différence étant l'accès au simulateur relatif à la consommation d'énergie et au graphique de planification de la production. Chaque cursus est représenté à part égale entre ces deux groupes.

Afin de s'assurer de l'absence de disparités fortes entre les deux groupes, tous les participants ont répondu à un questionnaire portant sur leur expérience personnelle. Ce questionnaire porte sur trois points en particulier : leur expérience dans l'utilisation de robots, leur expérience avec les cellules de production industrielle, ainsi que leur expérience avec les jeux de stratégies et/ou de gestion. Cette dernière question peut paraître surprenante, mais elle n'est pas anodine car elle était apparue très pertinente lors des travaux antérieurs de Habib et al. (2018). Ces travaux portaient sur un système composé d'une flotte de robots mobiles supervisée et contrôlée par un opérateur unique, aujourd'hui devenu un sous-système de notre plateforme (voir chapitre 4). Les réponses possibles pour toutes ces questions s'étendent de « jamais » à « toujours » (échelle de 5 niveaux) et concernent la fréquence à laquelle les participants interagissent avec les systèmes (robots, cellules de production, jeux). Aucune disparité entre les deux groupes n'a été observée sur le critère de l'expérience. Cependant, une forte variabilité intra-groupe de l'expérience a été observée pour les deux groupes. Seule l'expérience avec les cellules de production industrielle apparaît comme faible pour les participants. Ce manque d'expérience offre peu de points de comparaison aux participants dans l'optique d'une évaluation du système proposé, mais a l'avantage de les rendre plus ouverts aux décisions et informations, puisqu'ils ont un regard neuf sur un nouveau type de système. La participation aux expérimentations leur a également offert la possibilité de découvrir en quoi la confrontation à une cellule de production complète est riche d'enseignement.

Du point de vue de l'activité à réaliser, tous les participants reçoivent un plan de production composé de trois lots de produits différents à réaliser par un ensemble de sept robots de production (W1 à W7). Ces robots de production sont approvisionnés par deux

AGV et reliés par un système guidé par rail sur lequel transitent six navettes (shuttles) qui véhiculent les produits (cf. chapitre 4). En mode automatique, ces produits s'auto-organisent en sélectionnant leur destination par utilisation des champs de potentiel émis par les robots, fonctions de leur capacité et délai de production (voir Annexe 3). En mode manuel, il est possible d'affecter directement aux produits un robot de production. Dans tous les cas, le trajet vers les robots de production est géré de manière complètement automatisée (en utilisant un algorithme parcours dans un graphe orienté temporisé). Dans notre cas, ces produits sont nommés « L », « T » et « I » et requièrent des opérations différentes, avec quelques similarités (voir Figure 26). Chaque opération réalisable est numérotée de un à sept et peut être réalisée plusieurs fois pour un même type de produit. Les opérations sont toujours réalisées dans un ordre croissant (elles sont ordonnées) et chaque opération doit être réalisée autant de fois que spécifié (à chaque fois, un composant est assemblé) avant de pouvoir passer à la suivante. Les produits « L » et « I » sont assez similaires, mais génèrent une charge différente sur les robots de production (voir Figure 27). Le produit « T » nécessite quant à lui une opération plus lente qui lui est propre (elle ne peut être réalisée que par un robot spécifique).

Operation Produit	1	2	3	4	5	6	7
L	3	0	0	2	2	0	0
T	2	1	1	0	0	0	0
I	2	0	0	1	1	0	0

Figure 26 Opérations à réaliser par type de produit

Robot de production	Operations	Temps (s)	Consommation totale	Stockage maximum
W1	chargement ; déchargement	10 ; 10	100 ; 100	8
W2	1 ; 2 ; 4	20 ; 20 ; 20	500 ; 250 ; 475	20
W3	2 ; 5	20 ; 20	250 ; 100	25
W4	3 ; 4 ; 5	20 ; 20 ; 20	450 ; 300 ; 100	30
W5	6 ; 1	5 ; 20	500 ; 375	25
W6	7 ; 4	20 ; 15	500 ; 450	25
W7	1	10	500	9999

Figure 27 Opérations disponibles par machine, avec le temps de réalisation et la consommation associés, ainsi que la capacité de stockage maximum de matière première (1 opération = 1 unité consommée)

Le volume de produit à réaliser (plan de production) est de cinq produits « L », quatre produits « T » et six produits « I ». Il est demandé aux participants de suivre le plan de production tout en maintenant la consommation énergétique en dessous d'un seuil communiqué au participant par le système. Chaque robot est conçu pour consommer une unité de matière première (composant) par opération réalisée. Le robot W1 constitue un cas particulier ; il ne peut réaliser aucune opération d'assemblage mais est le seul capable de charger et décharger les navettes de leurs produits. De ce fait, seul le déchargement consomme une unité de matière première ; ceci, dans le but de représenter le nombre de produit achevé stockable sur place. Le participant a donc comme tâche principale de fabriquer l'ensemble des produits demandés et comme tâche secondaire de réapprovisionner les robots de production en matière première pour les maintenir en fonction. Bien que le robot W1 soit un cas particulier, celui-ci est traité de la même façon que les autres du point de vue du réapprovisionnement. Chaque machine a une capacité de stockage différente, présentée dans la Figure 27.

Le participant doit réagir pour faire face à des événements inattendus, programmés dans des scénarios et déclenchés à des temps donnés prédéterminés. Le premier changement intervient à la troisième minute, avec une baisse progressive du seuil limite de consommation énergétique globale à soixante-cinq pourcents de sa valeur sur une durée de quarante-cinq secondes. Le deuxième événement intervient à la cinquième minute et consiste en une panne d'un robot de production moyennement chargé. Après trois minutes de panne, le robot est remis en fonction automatiquement. Le dernier événement intervient une minute après la remise en état du robot et correspond à une augmentation du seuil de consommation à quatre-vingts pourcents de sa valeur initiale.

T (s)	0	180s	195s	210s	225s
E	Début de l'expérimentation	Limite de consommation : 90%	Limite de consommation : 80%	Limite de consommation : 70%	Limite de consommation : 65%
T (s)	300s	420s	480s	600s	780s
E	Panne de W3	W3 réparé et opérationnel	Limite de consommation : 80%	Délais limite de production	Fin de l'expérimentation

Figure 28 Frise chronologique des événements (E) perturbateurs

Les deux groupes de participants ont accès à un ensemble d'interfaces différentes afin d'évaluer l'apport des systèmes d'aide conçus. La différence réside dans la disponibilité de l'aide à la planification de la production, ainsi que de celle du système de simulation de la consommation d'énergie. Le plan de production à réaliser, ainsi que le scénario des événements perturbateurs, restent les mêmes pour les deux groupes. Des notes au format papier, contenant les procédures adaptées à leur groupe respectif, ont été mises à disposition des participants pendant les passations, pour rappeler les tâches à réaliser selon les situations ou états du système industriel cyber-physique. Ces procédures offrent des directives très générales afin de ne pas limiter ou bloquer l'opérateur dans sa prise de décision. Cinq grands cas sont couverts par ces notes : une panne machine, une surconsommation, un comportement inattendu de la cellule, un robot de production ne pouvant bientôt plus réaliser d'opération et une situation sans événement notable.

1.2 Procédure

Chaque participant est accueilli avec une présentation détaillée du système industriel cyber-physique sous la forme de diapositives. Trente minutes sont à sa disposition pour en prendre connaissance en autonomie. Le participant est encouragé à poser autant de questions que souhaité à l'équipe d'expérimentation afin de comprendre au mieux le système et ce qui est attendu de tout participant. La présentation contient une description du système de score mis en place dans le but d'évaluer la qualité de la production réalisée par les participants. Ce score tient compte de l'accomplissement du plan de production, de la consommation globale, de la surconsommation ainsi que d'un bonus d'efficience. Le bonus d'efficience est un montant fixe additionné au score dans le cas où un participant maintient un ratio de consommation par produit réalisé en dessous d'un seuil. Certains facteurs du score sont néanmoins cachés au participant, tel que les malus de collision des AGVs, car nous préférons conserver la production comme l'aspect principal de l'activité. Le participant a cependant été prévenu d'éviter les collisions avec les AGVs. Chaque participant est informé que le score ainsi obtenu est également utilisé par leur professeur référant afin de leur accorder un bonus sur une de leur note ; ceci, pour créer une motivation. Il est également demandé à chaque participant s'il souhaite faire partie d'un classement des participants, partagé ultérieurement parmi les personnes concernées. Ce classement a également pour vocation de motiver les participants en appuyant sur le côté compétitif.

Le participant est ensuite amené au poste de supervision et se voit présenté en quelques minutes les éléments principaux décrits dans les diapositives. Le participant dispose alors de quinze minutes d'essai pour s'habituer au système, aidé de l'équipe d'expérimentation pour s'assurer que l'entraînement est correct et équivalent entre les participants. L'équipe d'expérimentation incite le participant à exploiter toutes les fonctionnalités à disposition et présente les principales perturbations qui peuvent survenir sur le système. Un soin particulier est accordé au fait d'instruire le participant sans donner le moindre indice sur le scénario auquel il devra faire face. Les plans de production utilisés lors de l'entraînement, et donc les scénarios, sont différents de ceux de l'expérimentation et aucune perturbation n'est utilisée.

A l'issue de l'entraînement, les participants doivent pouvoir réaliser quatre tâches principales :

- Superviser le système de production, établir l'état des robots de production et AGVs, la consommation globale et l'état de la production.
- Gérer la surconsommation en réaffectant les navettes vers des robots de production plus efficaces, par champ de potentiel ou ordre direct, et en décalant la production de produit nécessitant des opérations coûteuses en énergie.
- Gérer la panne d'un robot de production en replanifiant la production avec des produits plus adaptés aux ressources à disposition.
- Utiliser le système de simulation (seulement le groupe avec l'aide) pour simuler de nouveaux réglages pour les champs de potentiels et améliorer l'auto-organisation des produits.

Une fois l'entraînement achevé, l'équipe d'expérimentation prépare le système pour le scénario d'évaluation et demande au participant de se préparer. Une fois que le participant se déclare prêt, l'équipe d'expérimentation donne le signal de départ et lance l'expérimentation pour une durée de dix minutes. L'équipe d'expérimentation reste alors autant que possible en dehors du champ de vision du participant afin de ne pas causer de distractions involontaires (par exemple en prenant des notes). L'équipe d'expérimentation garde cependant le participant dans son champ de vision et dispose de plusieurs retours vidéo pour vérifier le bon déroulement de l'expérimentation (cf. chapitre 4).

En cas de problème, il est permis au participant d'interpeller l'équipe d'expérimentation pour poser une question et il est fortement encouragé à le faire si un défaut technique semble être constaté sur la plateforme. L'équipe d'expérimentation est autorisée à fournir

uniquement des réponses simples afin de ne pas influencer le participant. Ces réponses ne peuvent porter que sur des fonctionnalités de base du système, des informations déjà fournies au participants, ainsi que des informations de diagnostic si un défaut est suspecté. En cas de problèmes techniques/défauts, l'équipe de supervision peut utiliser des commandes dédiées (non disponibles au participant) dans le but de corriger à distance le problème. Dans le cas où le problème ne pourrait être résolu de cette façon, l'équipe d'expérimentation dispose également de la possibilité de se substituer à certaines fonctions du système pour assurer la continuité de l'expérimentation.

A la fin de dix minutes d'expérimentation, le système est laissé en fonction pendant trois minutes additionnelles sans intervention pour collecter les dernières informations, notamment si des produits étaient sur le point d'être achevés. Il a en effet été constaté lors des tests de la phase pré-expérimentale qu'il était courant d'avoir des produits finis mais non livrés lorsque les dix minutes sont atteintes. Ceci provient principalement du temps nécessaire pour déplacer un produit au sein de la cellule, qui peut se révéler relativement long dans certains cas. Les produits livrés dans cette fenêtre de trois minutes sont comptés dans le score mais avec un malus de retard. Aucun autre facteur n'est pris en considération lors de ces trois minutes. Une fois ces trois minutes additionnelles écoulées, la plateforme est stoppée et l'expérimentation est terminée. Le participant reçoit alors un score temporaire et doit compléter un questionnaire visant à évaluer la plateforme. Ce questionnaire est organisé en quatre grandes parties.

La première partie du questionnaire se concentre sur la compréhension du système industriel cyber-physique par le participant. Il est demandé au participant d'indiquer, dans l'ordre décroissant, les trois robots de production qui sont : les plus efficaces, les plus efficaces, les plus surchargés (le moins de temps inactif), les plus utilisés (plus d'opérations réalisées), et ceux qui consomment la matière première le plus rapidement. Ces questions permettent d'évaluer la qualité de la connaissance du système élaborée par le participant lors de l'expérimentation, ou encore le modèle qu'il s'en est construit.

La deuxième partie du questionnaire porte sur la perception par le participant de l'intelligence de la cellule, ici représentée par les navettes autonomes. Chaque question est notée sur une échelle de un (pas du tout) à sept (totalemment), permettant une réponse neutre (quatre). Le premier jeu de questions porte sur la compréhension par le participant des compétences des navettes autonomes en matière de perception de l'information sur le procédé, d'analyse de ces informations, de prise de décision et d'implémentation de l'action. Le deuxième jeu de questions porte sur la compréhension par le participant des

capacités de coopération des navettes autonomes, via la capacité du participant à obtenir des informations sur les navettes, de détecter les conflits avec la prise de décision des navettes, de gérer ces conflits et d'avoir le sentiment d'avoir le contrôle des navettes. Le troisième jeu de questions porte sur la compréhension par le participant de la capacité des navettes autonomes à percevoir l'activité du participant. Il est demandé au participant d'évaluer, selon lui, la perception par les navettes autonomes de sa propre compétence à coopérer à la détection et la gestion de conflits, ainsi que de gérer l'autorité.

La troisième partie du questionnaire porte sur la charge de travail ressentie par le participant. Son évaluation est réalisée à l'aide du NASA TLX (Hart 2006). Ce questionnaire est organisé autour de six facteurs clefs : l'exigence mentale, l'exigence physique, l'exigence temporelle, la performance, l'effort et la frustration. Le participant doit évaluer dans un premier temps, sur une échelle de un à dix, l'implication de chaque facteur sur la charge de travail ressentie lors de l'expérimentation. Ensuite, tous ces facteurs sont croisés à travers quinze questions de façon à ce que le participant choisisse à chaque fois le facteur qui, parmi deux facteurs, a le plus contribué à sa charge de travail. Il est ainsi possible de pondérer l'évaluation initiale de l'opérateur afin d'obtenir la contribution « réelle » de chaque facteur à la charge de travail globale. La somme des facteurs pondérés correspond à la charge de travail globale ; elle est indiquée en pourcentage (entre zéro et cent).

La dernière partie permet de collecter les retours du participant sur l'expérimentation en elle-même, au travers de trois questions notées de un (faible/mauvais) à dix (haut/bon). Les questions portent sur la complexité de l'environnement, la qualité de l'entraînement (suffisant ou pas) et l'utilisation des informations de l'interface. Pour finir, les participants reçoivent la possibilité de délibérer brièvement avec l'équipe d'expérimentation puis peuvent rédiger leurs ressentis et suggestions sur feuille libre afin de compléter les données déjà recueillies.

En complément, de nombreuses informations en provenance du système sont enregistrées afin de pouvoir évaluer la production a posteriori. Il peut s'agir d'informations techniques, telles que la consommation ou la livraison de matières premières à un robot de production. Il peut également s'agir d'informations d'interaction, telles que les « clics » de l'utilisateur et de nombreux logs, permettant à la fois de reconstruire la chaîne des événements a posteriori, mais aussi d'évaluer la façon dont l'interface est utilisée par le participant.

1.3 Résultats et discussion

Dans un premier temps, il est à noter que les résultats de deux participants parmi les vingt-deux ont été rendus inutilisables (à cause de problèmes techniques ayant conduit à un changement significatif des conditions expérimentales). Nous avons donc conduit une analyse statistique sur les vingt résultats restants et réalisé des tests de significativité (ANOVA) sur toutes les données obtenues avec un seuil de confiance à 95%. Cela signifie que si nous calculons avec l'ANOVA une « valeur p » inférieure à 0,05, il y a 95% de chance que les variations entre les résultats testés ne soient pas liées au hasard (significatif). Les résultats de ces tests sont publiés dans (Habib et al. 2021). Une première observation est qu'il y a peu de résultats statistiquement significatifs (la valeur p calculée est supérieure au seuil de 0,05) parmi les données pouvant se prêter une telle analyse, ce qui les rend difficilement exploitables. Cependant certains résultats présentent une valeur de p inférieure au seuil de 0,05 les rendant significatifs. Ces résultats significatifs seront donc mis en avant dans les paragraphes suivants, accompagnés des graphiques associés.

Parmi les résultats significatifs, une relation a été identifiée entre l'expérience en matière de jeux de gestion/stratégie et la charge de travail ressentie par les participants ($p=0,0424$). Il est possible d'observer sur le graphique en boîte à moustache¹ (Figure 29) que les participants jouant plus souvent aux jeux de gestion/stratégie ressentent une charge de travail moindre que leurs homologues. Cela peut s'expliquer par l'interface de supervision du système qui, sur de nombreux éléments, possède des similitudes avec de tels jeux. Une similitude en termes de tâche, ou du moins d'organisation des tâches avec notre système a été également constatée. Il s'agit d'un point de prospection intéressant, à la fois pour la conception du système mais aussi pour l'entraînement des opérateurs.

¹ Sur un graphique en boîte à moustache, l'extrémité des moustaches représente les valeurs minimum et maximum, le rectangle représente l'intervalle du 1er et 3e quartiles, et le point central représente la médiane

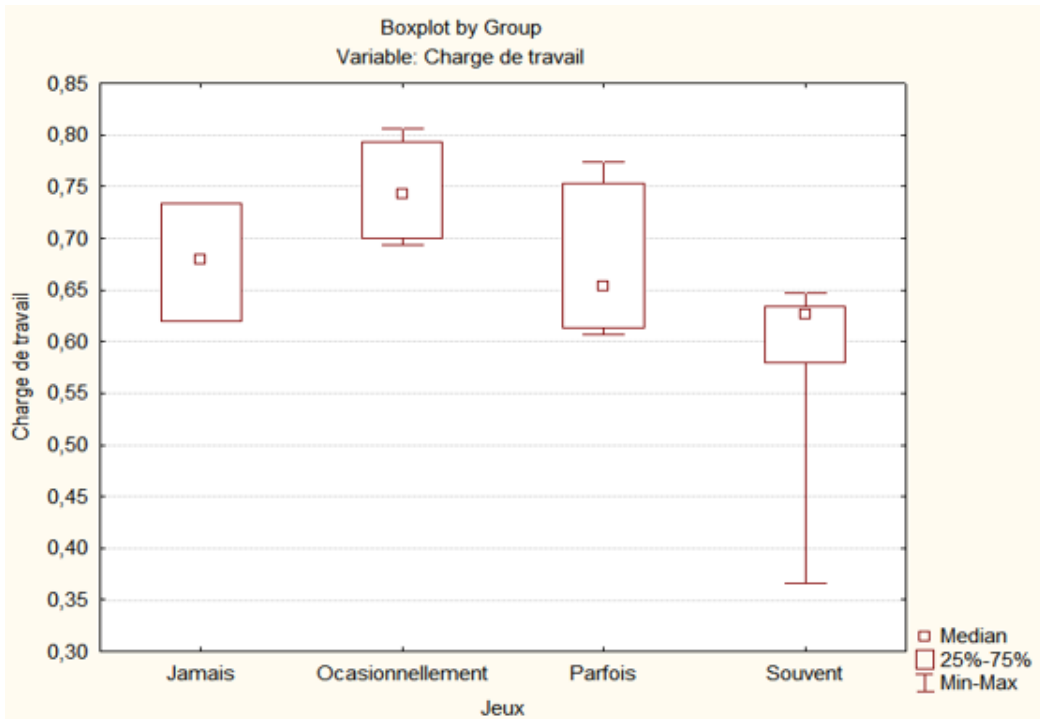


Figure 29 Relation entre l'expérience dans les jeux de gestion/stratégie (abscisse) et la charge de travail ressentie (ordonnée) ; $p=0.0424 (<0,05)$

Par ailleurs, plusieurs autres résultats significatifs liés à l'expérience en termes de jeux de stratégie/gestion ont également été identifiés. Par exemple, les participants ayant le plus d'expérience tendent à évaluer l'exigence mentale ressentie comme plus faible (Figure 30). Il faut cependant noter qu'il s'agit là d'une valeur subjective donnée par le participant. L'exigence temporelle pondérée qui correspond à la contribution de l'exigence temporelle à la charge de travail globale (voir partie 1.2), montre la même tendance en faveur des utilisateurs ayant de l'expérience dans les jeux (Figure 30). Il en va de même pour l'évaluation de la capacité à détecter et à gérer les conflits des navettes (Figure 31). Les participants expérimentés en jeux de stratégie/gestion tendent à mieux noter ces deux compétences que les moins expérimentés. Il est à noter que les deux graphiques montrent des formes différentes de la boîte à moustache ; le segment représente l'intervalle de confiance (à 95%) et le point représente la valeur moyenne.

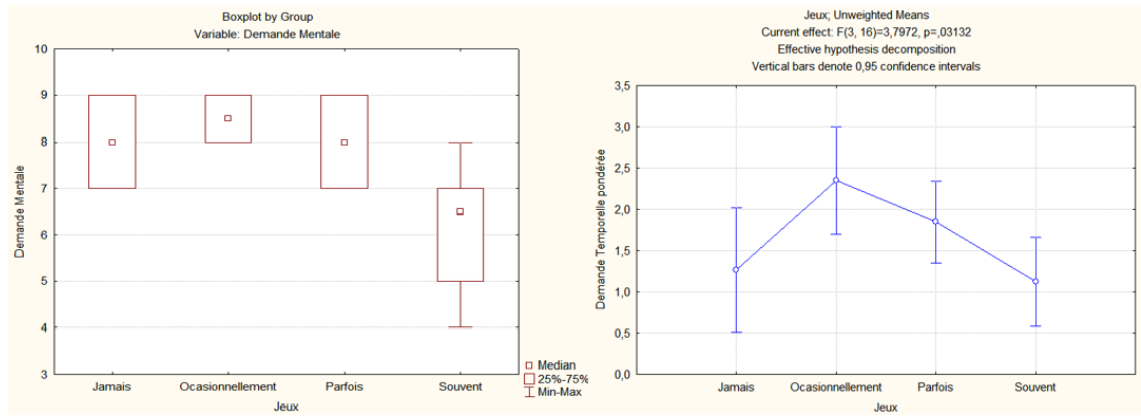


Figure 30 Relation entre l'expérience dans les jeux de gestion/stratégie (abscisse) et l'exigence mentale estimée (ordonnée) à gauche et l'exigence temporelle pondérée (ordonnée) à droite ; respectivement $p=0.0433 (<0,05)$ et $p=0.03132 (<0,05)$

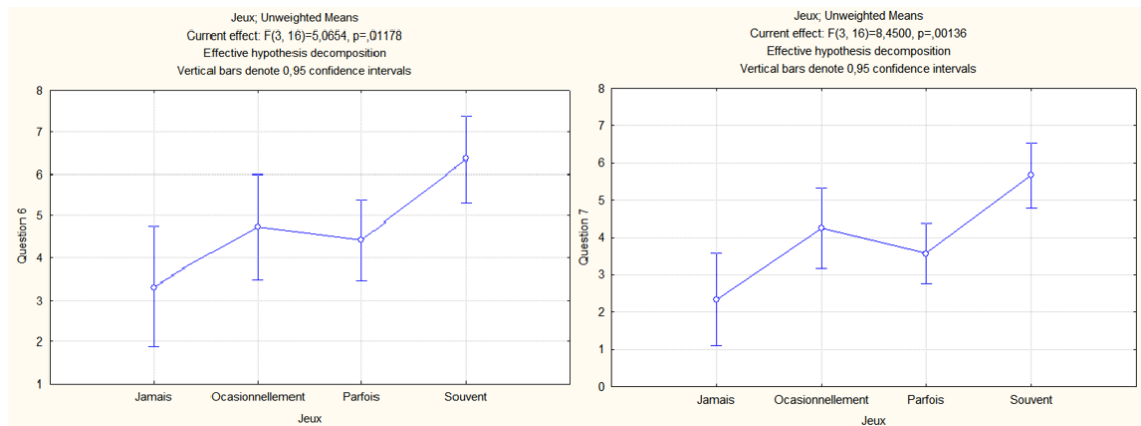


Figure 31 Relation entre l'expérience dans les jeux de gestion/stratégie (abscisse) et l'évaluation de la détection (Q6) (ordonnée) à droite et la gestion (Q7) des conflits par les navettes (ordonnée) à droite ; respectivement $p=0.01178 (<0,05)$ et $p=0.00136 (<0,05)$

Un résultat significatif est établi entre l'expérience des participants dans l'utilisation de robots et le score obtenu (Figure 32). Les participants ayant souvent utilisé des robots ont eu un score statistiquement plus faible que les autres participants. Nous avons deux explications possibles pour ce résultat :

- Les participants expérimentés ont des attentes en termes de contrôle et/ou de qualité d'interaction liées à leur expérience passée. Les perturbations ainsi que les erreurs possibles des robots ont donc pu générer plus d'interruptions qu'initialement anticipées par le participant, impactant les performances.

- Les participants expérimentés accordent plus d'importance à la gestion et la résolution de problème d'un système qu'ils connaissent (les robots), délaissant les autres tâches alors que celles-ci participent au score général.

Ce résultat est cependant compliqué à exploiter en l'état, car les données qui auraient dû nous fournir des éléments de réponse plus concrets se sont montrées pour la plupart non significatives. Cependant, maintenant que nous connaissons la relation entre ces deux critères, nous pourrions compléter cette observation avec plus de données en organisant d'autres expérimentations. En effet, le volume des données a un impact sur les chances d'obtenir un résultat significatif, car l'écart type entre les valeurs d'un même groupe tend à se réduire lorsque le volume augmente. Dans notre expérimentation, qui ne repose que sur vingt participants, le nombre de données par niveau d'expérience est trop faible.

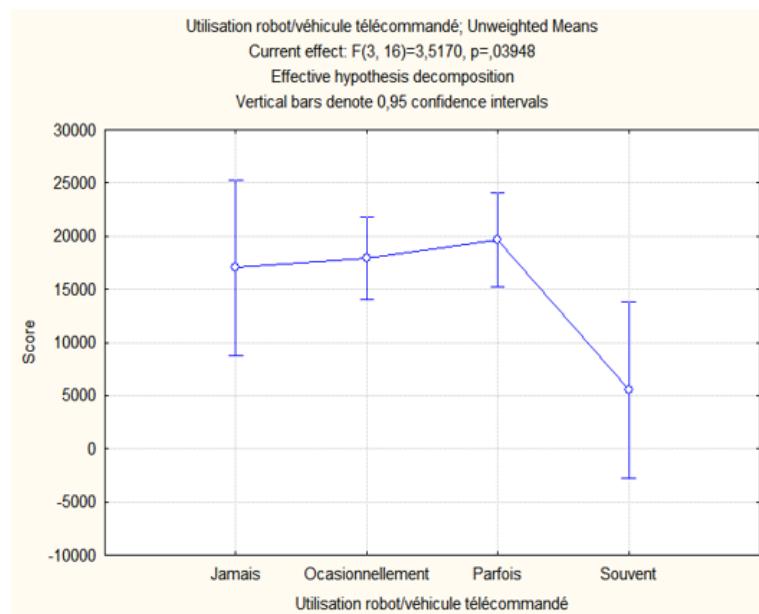


Figure 32 Relation entre l'expérience avec les robots (abscisse) et le score obtenu (ordonnée) ; $p=0.03948 (<0,05)$

Un élément important est que l'on observe un résultat significatif entre la charge de travail ressentie et les conditions expérimentales (Figure 33). Ce résultat est cependant à l'opposé de nos attentes initiales, car la disponibilité du système d'aide semble augmenter l'exigence mentale au lieu de la décroître. Après investigations, un autre élément pourrait venir expliquer ce résultat : l'étude des produits planifiés par les participants des deux groupes (avec aide ou sans aide) met en évidence une différence. Le groupe n'ayant pas de système d'aide a opté en majorité (60%) pour la planification de deux produits de chaque type. Le système disposant de six navettes, les participants ont opté pour le choix d'apparence le plus équilibré. A l'opposé, le groupe bénéficiant du système d'aide montre

des stratégies plus variées, avec huit stratégies différentes. La différence de charge de travail peut donc s'expliquer par le fait que ceux qui ont bénéficié du système d'aide ont réellement cherché à optimiser leur production, incités par l'aide apportée à cette tâche. Cette différence dans la recherche d'optimisation n'est cependant pas observable dans les scores de production, car le fait de planifier deux produits de chaque type n'est pas pénalisant dans cette configuration. C'est donc potentiellement un biais du scénario (ne pas avoir davantage pénalisé une stratégie de planification trop rudimentaire) qui aurait pu conduire à conclusion erronée, si nous n'avions pas pu compléter l'analyse en utilisant les logs de planification. Ce constat nous permet par la même occasion de souligner à nouveau (cf. chapitre 4) l'importance de l'enregistrement des interactions de l'utilisateur.

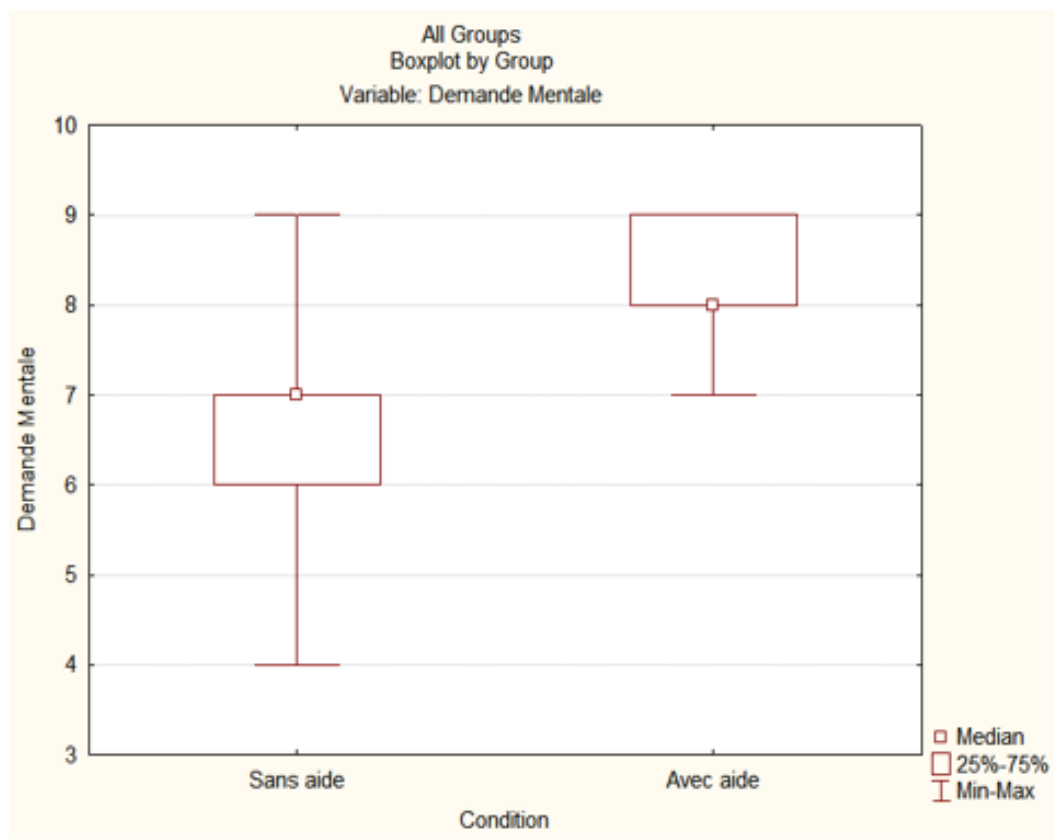


Figure 33 Relation entre condition expérimentale (abscisse) et la demande mentale (ordonnée) ; $p=0.017258 (<0,05)$

Plusieurs données ne pouvaient cependant pas être analysées en utilisant une ANOVA, car les prérequis n'étaient pas respectés. De ce fait, la méthode de « Corrélation de Spearman » a été utilisée en n'analysant non pas les valeurs mais le rang de celles-ci. La valeur de corrélation obtenue représente ainsi la relation entre les données testées, à condition que la valeur p soit significative. Plusieurs résultats se sont montrés significatifs (valeur de p inférieure à 0,05) et sont présentés dans la (Figure 34). Des corrélations

négatives, signifiant que l'augmentation d'un des paramètres est liée à la décroissance de l'autre, sont identifiées entre la qualité de l'entraînement évaluée par le participant et les différents facteurs de la charge de travail. Ainsi, la qualité de l'entraînement influe directement sur la charge de travail du participant. Ce résultat se répercute également sur l'évaluation des compétences des navettes. La prise d'information sur les navettes (Q5), la détection des conflits (Q10) et le sentiment d'être au contrôle des navettes (Q8) tendent tous les trois à être plus élevés lorsque l'entraînement est bien évalué par le participant.

Spearman Rank Order Correlations (all-data-update) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p < .05000		Spearman Rank Order Correlations (all-data-update) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p < .05000	
Variable	Question 5	Question 10	Variable
entraînement suffisant	0,539252	0,549323	entraînement suffisant

Spearman Rank Order Correlations (all-data-update) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p < .05000		Spearman Rank Order Correlations (all-data-update) MD pairwise deleted Marked correlations are significant at p < .05000 N=20 (Casewise deletion of missing data)		
Variable	Question 8	Demande Mentale	Demande Physique	Charge de travail
entraînement suffisant	0,51	-0,508110	-0,526302	-0,510955

Correlations (all-data-update) Marked correlations are significant at p < .05000 N=20 (Casewise deletion of missing data)		Correlations (all-data-update) Marked correlations are significant at p < .05000 N=20 (Casewise deletion of missing data)	
Variable	Question 8	Frustration pondérée	
entraînement suffisant	0,51	-0,50	

Figure 34 Les différents coefficients de corrélation significatifs avec l'évaluation de l'entraînement

D'autres informations pertinentes sont issues de la rédaction libre des participants. Cependant, s'agissant d'une rédaction libre, il s'agit d'une interprétation par notre équipe des écrits. Il est donc impossible de quantifier ces informations et l'exactitude des propos n'est pas démontrée.

Plusieurs participants ont noté le fait qu'une grande partie de leur attention était dédiée aux tâches du niveau opérationnel et que, par conséquent, il était difficile de réellement bénéficier du système d'aide au niveau tactique. Plusieurs participants ont également suggéré que cette organisation de leurs activités pouvait provenir d'un manque d'entraînement sur le système et sur le système d'aide. De plus, ils auraient souhaité passer plus de temps à planifier leur production alors que notre protocole expérimental les forçait à lancer immédiatement la production ; ceci, dans le but de maintenir une pression temporelle. Ce choix de maintenir une pression temporelle est lié aux contraintes propres à l'expérimentation, pour laquelle nous disposons d'un temps très limité alors que le processus de production est relativement long.

Les participants ont également exprimé une sensation de dissociation entre l'activité des AGVs et celle de la cellule de production, contrairement à notre volonté d'intégrer les deux sous la forme d'un système uni. Cette dissociation provient notamment du fait qu'une grande partie des échanges d'informations et interactions de manière générale entre les deux systèmes sont réalisées par le participant. Ils auraient souhaité plus de

coopération entre les deux systèmes, notamment des alertes envoyées aux AGVs lorsque le niveau de composants d'un robot de production est bas. Ce cloisonnement entre les deux sous-systèmes est en effet observable sur les schémas techniques du chapitre 4. Une amélioration dans le domaine est très souhaitable, notamment pour respecter le principe d'intégration horizontale (cf. perspectives).

Une partie des participants a également exprimé le désir de pouvoir interagir plus avec la vue de la cellule de production. Ils souhaitent notamment avoir plus d'informations sur la destination de chaque navette et le temps nécessaire avant d'atteindre leur destination. Ils sont également nombreux à souhaiter plus d'informations sur les opérations réalisables par les robots de production directement sur la cellule, ainsi que le temps nécessaire estimé pour finir un produit ou achever une opération.

Les participants ont précisé qu'il était difficile de partager leur attention entre les quatre écrans et donc de bénéficier de l'ensemble des systèmes d'aide. De plus, la façon de présenter l'aide à la planification, à savoir par opération et non par robot de production (tel que planifié initialement, cf. chapitre 4), a été soulignée comme problématique par les participants. Les suggestions faites par les participants dans le but d'améliorer cette aide constituent une source précieuse d'amélioration de notre approche de conception, telle que prévue dans le chapitre 3 (retour des utilisateurs experts).

Un autre point abordé par les participants est le niveau d'intelligence du système industriel cyber-physique. Dans un contexte Industrie 4.0, ces commentaires nous semblent tout particulièrement pertinents ; les participants souhaiteraient, en effet, rendre le système plus intelligent et plus coopératif pour faciliter leur tâche de supervision. Cela montre que, dans ce cas précis, des entités purement réactives ne sont pas perçues comme suffisamment intelligentes et/ou coopératives, bien qu'elles répondent, normalement, au critère de pouvoir faire face aux situations inattendues. L'utilisation d'un autre type d'architecture de contrôle pourrait donc se révéler intéressant à étudier, ce qui inciterait la communauté à développer plus d'intelligence dans les entités artificielles composant le système industriel cyber-physique (Trentesaux 2007).

Le CWA nous a apporté une grande aide dans la conception du système. On peut dire, réciproquement, que la création de la plateforme et la réalisation d'expérimentations fournissent également des informations utiles à l'analyse CWA. En effet, en plus des informations fonctionnelles (principalement les interactions avec le système) obtenues lors de la réalisation des expérimentations, les retours des participants et la disponibilité

nouvelle d'utilisateurs « experts » permet de compléter certaines étapes du CWA. Ce faisant, il est tout à fait possible d'envisager un nouveau cycle d'analyse afin d'affiner notre compréhension du système et de continuer à l'améliorer. Cette possibilité sera traitée dans les perspectives.

2. Seconde expérimentation

La seconde expérimentation reprend de nombreux aspects de la première expérimentation, mais bénéficie de quelques améliorations concernant l'organisation de l'activité de contrôle de la cellule et des AGVs pour tenter de répondre aux demandes des futurs utilisateurs. Ainsi, la position de contrôle a été séparée en deux parties : une partie liée à la production (robots et navettes auto-organisées) et une partie liée à la logistique (AGVs). D'un point de vue technique, quelques modifications ont également été apportées pour adapter la modification des positions de contrôle et pour consolider les données (synchronisation). Ces changements et les objectifs de cette seconde expérimentation sont présentés dans les parties suivantes, avant de discuter des résultats obtenus.

2.1 Organisation et procédure

Un nouveau groupe de participants a été sélectionné. Il comprend vingt-quatre participants dont quatre femmes, tous âgés de vingt à vingt-sept ans (moyenne : 21,16 ; déviation standard : 8,90). Contrairement à l'expérimentation précédente, les participants forment des groupes de trois avant d'être répartis en deux grands groupes liés à la mise à disposition ou non des systèmes d'aide (simulateur et graphique de planification). Un graphique reprenant les cycles de rotation est disponible en annexe pour plus d'informations (Annexe 4). L'objectif de cette expérimentation est de vérifier que la coopération humain-humain permet d'augmenter les performances en spécialisant les rôles des participants avec une partie production et une partie logistique distinctes mais nécessitant une coopération. Une attention particulière est accordée aux échanges entre participants, notamment afin d'identifier les informations qu'ils considèrent comme étant utiles.

La formation en groupe de trois trouve sa justification dans le fait que la partie production et la partie logistique sont dorénavant réalisées par deux participants différents afin partager la charge de travail, au détriment d'un surcoût pour gérer la communication et

l'organisation entre les participants. Le troisième membre du groupe est présent pour évaluer la communication entre les deux autres participants, et fournir des suggestions uniquement en fin d'une phase expérimentale, avant de passer à la suivante. Le membre en charge de l'évaluation n'est pas contraint à une méthode d'évaluation en particulier, mais est encouragé à écrire tout événement semblant relevant vis-à-vis de sa tâche. La différence avec la première expérimentation se situe ainsi au niveau de l'allocation des tâches, maintenant plus spécialisées, et au niveau de la coopération via le langage naturel (voix) entre la logistique et la production.

Étant donné ce partage de tâche, les interfaces à disposition se trouvent modifiées. L'opérateur de production voit ainsi l'écran de planification amputé de la partie logistique (partie gauche de l'écran) et les deux écrans de contrôle et supervision des AGVs sont remplacés par une vue caméra du dessus de la cellule (Figure 35). L'opérateur de logistique, quant à lui, a à sa disposition les deux écrans de gestion des AGVs et a en complément la même vue caméra du dessus de la cellule que l'opérateur de production. Le partage de cette vue permet aux opérateurs de mieux se coordonner. L'opérateur d'évaluation est quant à lui simplement placé près du procédé simulé (projection de la cellule de production et AGVs) pour suivre l'activité et prendre des notes. Un casque micro est fourni aux opérateurs pour permettre le contrôle des échanges verbaux ainsi que leurs enregistrements ; le casque micro étant configuré en « push-to-talk », les opérateurs peuvent difficilement initier de réactions involontaires en verbalisant une pensée non destinée au second opérateur. L'opérateur d'évaluation quant à lui ne peut qu'écouter les conversations (il est récepteur et pas émetteur).

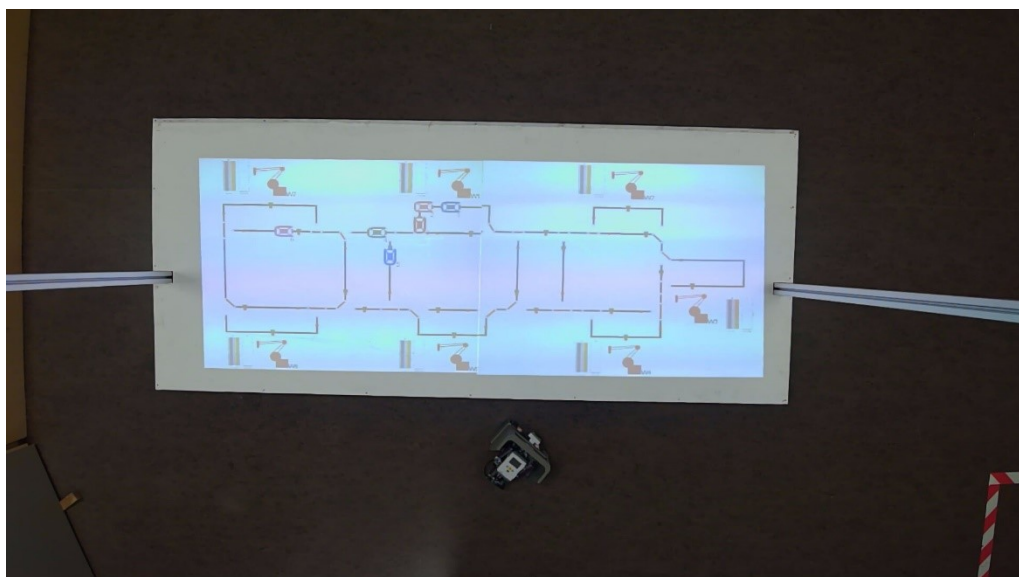


Figure 35 Vue de la cellule par caméra

La phase de présentation initiale de la plateforme, qui se fait à l'aide de diapositives devant être lues par le participant, n'est plus réalisée sur site. Pour gagner du temps, les diapositives sont désormais envoyées aux participants qui doivent en prendre connaissance avant la passation².

Chaque phase expérimentale débute par un entraînement de dix minutes, contre quinze précédemment. S'en suivent dix minutes d'expérimentation, puis une délibération entre les participants (enregistrée) pour leur permettre d'échanger leurs idées, notamment sur leur organisation. Une fois l'échange terminé, les participants répondent à un questionnaire spécifique au poste occupé pendant la phase (production, logistique, ou évaluation). Les participants échangent ensuite leur place (permutation circulaire sur les trois postes) et une nouvelle phase débute. Cette nouvelle organisation implique la réalisation de nouveaux scénarios et de plans de productions supplémentaires pour chaque phase.

D'un point de vue technique, un décalage a pu être observé entre le temps écoulé sur la plateforme (temps de production effectivement simulé) et le temps réel. Une légère surcharge en calcul de la plateforme provoque un retard dans la simulation s'accumulant progressivement (environ 9 minutes simulées pour 10 minutes réellement écoulées). Pour pallier les effets de ce décalage, la plateforme émet l'équivalent d'un signal de synchronisation à toutes les parties du système. Cette modification ne résout pas le problème car le retard existe toujours, mais cela permet de recaller les données et assure que chaque participant a bénéficié du même temps de production.

² D'une manière générale, nous avons dû également mettre en place une procédure spéciale afin d'accueillir les participants du fait de la crise sanitaire. En plus des rappels sanitaires de base, les outils à disposition des participants ont été systématiquement désinfectés et protégés du mieux possible durant l'expérimentation. De plus, le nombre de personnes présentes dans une même salle était également limité.

2.2 Résultats et discussion

Bien que l'expérimentation se déroule en trois passages pour chaque groupe (permutation circulaire de poste), seul le premier passage peut être comparé à la première expérimentation. En effet, seul le premier passage utilise le scénario de la première expérimentation et concerne des participants n'ayant jamais utilisé la plateforme (facteur d'apprentissage). Ainsi, dans le but de comparer les résultats et d'identifier les potentiels gains, seul le premier passage sera analysé.

Parmi les indicateurs de performances (voir Figure 36), et plus précisément leur moyenne entre les deux expérimentations, il est possible d'identifier des tendances bien qu'aucun résultat ne soit significatif (valeur $p > 0,05$). Ainsi le nombre de produits réalisés et le score tendent à être plus élevés lors de la seconde expérimentation, alors que la consommation d'énergie et la surconsommation tendent à être inférieurs. La non-significativité ne permet pas de conclure sur ces résultats, cependant la présence de ces tendances invite à penser qu'il serait possible d'atteindre un résultat significatif avec plus de données. Il pourrait être nécessaire d'étendre la durée des expérimentations ou encore de réaliser des expérimentations faisant intervenir plus de participants.

Variables dépendantes (Indicateurs de performance)	Moyenne (Dév. Std.)		Valeur p (Niveau de confiance à 95%)
	Expérimentation 1, n= 20	Expérimentation 2, n=24	
Produits achevés	6.80 (1.58)	7.04 (2.01)	0.273
Score de performance (e+04)	1.72 (0.652)	1.76 (0.821)	0.442
Consommation (e+04)	2.20 (0.325)	2.13 (0.355)	0.259
Surconsommation	623.60 (499.57)	418.08 (442.48)	0.106

Figure 36 Comparaison de la moyenne des indicateurs de performances et résultats du test de significativité entre la première expérimentation et la seconde

Concernant la charge de travail, une évaluation a été réalisée à l'aide du NASA TLX (voir section 1.2). Suite à cette évaluation, plusieurs tendances ressortent bien qu'elles soient pour la plupart non significatives (voir Figure 37). Ainsi, la frustration liée à la réalisation de la tâche (interruptions, difficulté, ...) et l'exigence temporelle ressentie tendent à baisser dans la seconde expérimentation. Il s'agit vraisemblablement d'un effet direct du partage de tâche permettant à l'opérateur de consacrer plus de temps à chaque tâche. Au contraire, l'effort et la performance semblent être légèrement plus élevés. Cela pourrait être lié aux attentes des autres participants ; il s'agirait alors d'une forme de pression exercée par les pairs. La différence n'est cependant pas significative (valeur $p > 0,05$) et donc aucune conclusion claire ne peut être tirée de ce résultat. Un résultat inattendu est celui de l'effort physique, évalué également avec le NASA TLX (auto-évaluation) : bien

que le système n'ait que peu changé dans le domaine, l'effort physique ressenti est en hausse et la différence entre les deux expérimentations est significative (valeur $p=0,034$). Il faut cependant considérer le fait que l'exigence physique ne constitue qu'un faible pourcentage de la charge globale (cf. paragraphe suivant) ; la significativité observée n'est pas liée à une hausse importante de cette dimension. Une hypothèse, à vérifier, est relative au coût de la communication engendré par la seconde organisation. La vérification de cette hypothèse mérite une attention toute particulière ; elle est à inscrire comme perspective à envisager à l'issue de ce travail. L'exigence mentale reste, quant à elle, semblable dans les deux cas, bien que la charge de travail globale soit légèrement plus faible lors de la seconde expérimentation. Ceci nous conforte dans l'idée que les systèmes étudiés sont d'une nature réellement complexe.

Variables dépendantes (NASA-TLX)	Moyenne (Dév. Std.)		Valeur p (Niveau de confiance à 95%)
	Expérimentation 1, n=20	Expérimentation 2, n=24	
Charge de travail	65.90 (9.47)	64.13 (18.75)	0.344
Exigence mentale pondérée	308.00 (110.15)	310.42 (108.33)	0.942
Exigence physique p.	8.50 (19.27)	43.75 (69.71)	0.034
Exigence temporelle p.	246.50 (111.23)	190.00 (90.26)	0.070
Performance pondérée	168.50 (70.36)	180.42 (114.46)	0.687
Effort pondéré	110.50 (72.73)	124.00 (110.38)	0.642
Frustration pondérée	146.50 (97.67)	113.33 (151.36)	0.404

Figure 37 Comparaison du NASA TLX entre la première expérimentation et la seconde

La pondération des différents facteurs du NASA TLX, combinant à la fois la première et la seconde expérimentation, permet d'identifier les facteurs contribuant le plus à la charge de travail des participants (Figure 38). On observe ainsi que l'exigence mentale est l'aspect le plus important, à 27%, suivi de la performance et de l'exigence temporelle respectivement à 23% et 20%. Au contraire, l'exigence physique contribue marginalement à la charge de travail, atteignant seulement 4%.

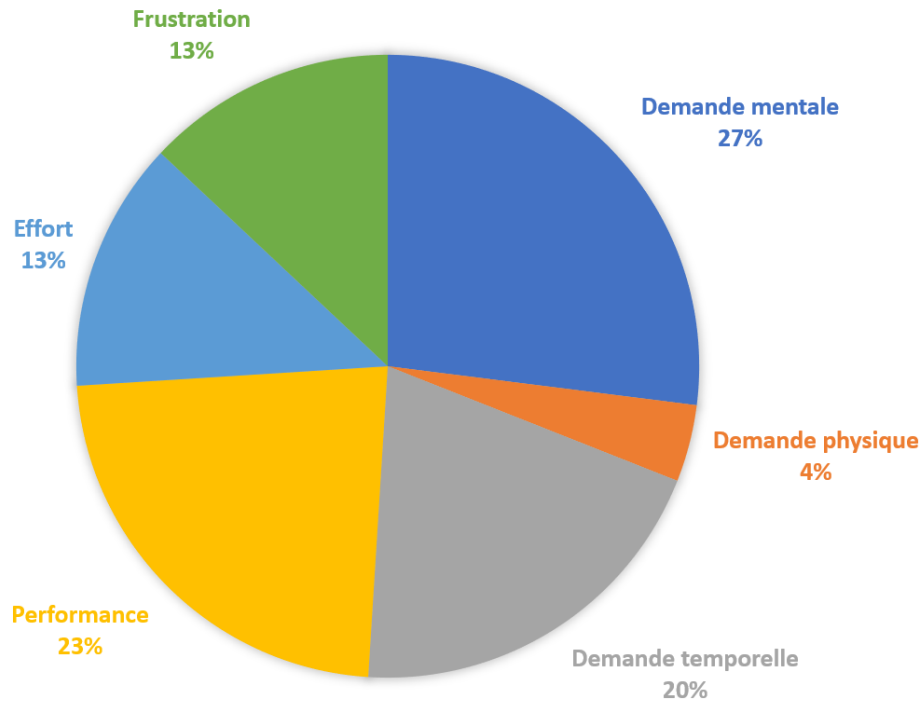


Figure 38 Pondération des facteurs du NASA TLX en pourcentage pour les organisations 1 et 2

Une comparaison des données sur la coopération Humain-Machine est possible en traitant les réponses fournies par les participants dans le questionnaire portant sur la coopération. Elle a été réalisée en trois parties concernant : le savoir-faire des navettes, le savoir-coopérer de l'opérateur, et le savoir-coopérer des navettes (voir Figure 39). Chaque réponse est fournie sur une échelle de Likert à sept niveaux, où 1 signifie « pas du tout » et où 7 signifie « totalement ». La liste exacte des questions posées est fournie en Annexe 5. Un premier élément significatif est le sentiment d'avoir le contrôle des navettes ($p = 0,049$). Lors de la seconde expérimentation, les participants se sentent significativement plus au contrôle des navettes que lors de la première. Cela souligne une augmentation du savoir-coopérer (cf. chapitre 2) de l'opérateur, probablement résultant du temps supplémentaire à disposition pour interagir avec les navettes. Nous pouvons aussi observer une légère tendance à mieux gérer les conflits avec les navettes (Figure 39) lors de la seconde expérimentation (4,15 contre 4,58) bien que le résultat ne soit pas significatif ($p = 0,167$).

Variables dépendantes (Questionnaire de coopération Homme- Machine)	Moyenne (Dév. Std.)		Valeur <i>p</i> (Niveau de confiance à 95%)
	Expérimentation 1, n= 20	Expérimentation 2, n=24	
Perception	5.05 (1.146)	4.92 (1.283)	0.602
Analyse de l'information	4.95 (1.191)	4.71 (1.628)	0.629
Prise de décision	4.65 (1.348)	4.29 (1.459)	0.797
Réalisation de l'action	6.00 (1.076)	5.42 (1.501)	0.909
Collecte d'information	5.55 (1.356)	5.42 (1.613)	0.544
Détection des conflits	4.90 (1.518)	4.79 (1.414)	0.567
Gestion des conflits	4.15 (1.496)	4.58 (1.442)	0.167
Contrôle des navettes	4.05 (1.432)	4.83 (1.606)	0.049
Détection des conflits	5.20 (1.361)	4.63 (1.345)	0.956
Gestion des conflits	4.80 (1.436)	4.75 (1.648)	0.452
Gestion de l'autorité	5.45 (1.276)	5.29 (1.160)	0.702

Figure 39 Comparaison du questionnaire de coopération Homme-Machine entre la première expérimentation et la seconde

3. Résultats complémentaires

De nombreux résultats se sont révélés être non significatifs lors des analyses précédentes. Ceci peut être en partie dû au faible nombre de participants ayant pris part aux deux expérimentations. Ainsi, afin de compléter les résultats précédents, nous avons décidé de poursuivre l'analyse en cherchant à identifier de possibles « clusters » de participants pour lesquels nous pourrions extraire des informations complémentaires. Cette recherche de « cluster » est présentée en détail dans Habib et al. (2021) et a été réalisée à l'aide de la méthode k-moyenne (Likas et al. 2003) avec l'aide du logiciel SPSS. La méthode k-moyenne est une technique de traitement statistique cherchant à rassembler les données étudiées (nos participants dans ce cas) sous la forme de groupes partageant des caractéristiques communes. Le critère de formation des groupes étant que les membres d'un même groupe doivent être aussi semblables que possible et aussi éloignés que possible de ceux des autres groupes. Du fait du nombre limité de données disponibles, la recherche a été limitée à deux « clusters ».

3.1 Cluster issu des données objectives

La première paire de clusters a été créée à partir du score de performance et du nombre d'utilisation du système de simulation (un des systèmes d'aide). La Figure 40 présente les résultats de l'ANOVA sur le cluster ainsi que le centre des clusters. La significativité

des différences en termes de réponses aux questionnaires a été testée d'un point de vue statistique, et les résultats significatifs sont représentés dans la Figure 41.

	ANOVA							
	Cluster		Error		Cluster Centers			
	Mean Square	dof	Mean Square	dof	F	Sig.	Cluster 1	Cluster 2
Score	1,450,453,042.50	1	21,620,446.899	42	67.087	<0.001	11,114	22,645
Use of assi.	47.728	1	19.623	42	2.432	0.126	1	3

Figure 40 Résultat de l'ANOVA sur le cluster basé sur le score de production et l'utilisation de la simulation, avec le centre des clusters (Habib et al. 2021)

Dependent Variables	Average (Std. Dev.)		p-Value (Confidence Level of 95%)
	Cluster 1, n = 20	Cluster 2, n = 24	
Workload	47.9 (14.3)	71.3 (9.54)	<0.001
Weighted Mental Demand	247.5 (122.0)	332.5 (93.98)	0.018
Weighted Performance	113.3 (67.9)	198.1 (95.80)	0.008
Weighted Frustration	50.8 (99.2)	157.5 (128.59)	0.005
Sufficient training	5.50 (1.17)	4.19 (1.203)	0.002
Environment complexity	3.67 (1.37)	4.69 (1.447)	0.037

Figure 41 Moyenne des résultats des participants par groupe et résultat du test de significativité (Habib et al. 2021)

Les résultats nous montrent que les participants dont le score est élevé et qui ont fortement utilisé le simulateur (système d'aide), soit le cluster 2, sont également ceux dont la charge de travail évaluée est la plus élevée, de même pour l'exigence mentale et la frustration. Les participants du cluster 2 ont également tendance à sous-évaluer leur performance en comparaison avec les participants du cluster 1. De plus, les participants du cluster 2 ont tendance à évaluer l'environnement comme plus complexe et l'entraînement comme moins satisfaisant. Pour finir, les réponses aux questions personnelles (âge, expérience, ...) montrent que le cluster 2 inclut des joueurs plus réguliers (46% des participants jouent souvent ou très souvent aux jeux vidéo) que le cluster 1 (45% des participant jouent au maximum occasionnellement aux jeux vidéo).

La seconde paire de cluster a été créée à partir des données concernant la consommation et la surconsommation (Figure 42). Le cluster 2, qui correspond à la consommation la plus faible, inclut plus de participants issus de la seconde expérimentation (69%) que le cluster 1 (46%). Rappelons que la différence entre les participants des deux expérimentations est que l'expérimentation 2 prône un travail d'équipe alors que l'expérimentation 1 fait travailler le participant seul. La significativité des différences

dans les réponses aux questionnaires a été testée mais aucun résultat statistiquement significatif n'a été obtenu.

	ANOVA							
	Cluster		Error		F	Sig.	Cluster Centers	
	Mean Square	dof	Mean Square	dof			Cluster 1	Cluster 2
Cons.	354,135,224.575	1	3,346,472.711	42	105.823	<0.001	23.777	17.879
Over-cons.	3,793,647.098	1	140,768.188	42	26.950	<0.001	733	123

Figure 42 Résultat de l'ANOVA sur le cluster basé sur la consommation et la surconsommation, avec le centre des clusters (Habib et al. 2021)

3.2 Cluster issu des données subjectives

Trois autres paires de clusters ont été créées à partir des réponses au questionnaire de coopération Humain-Machine (cf. Figure 43). Le cluster 1 correspond au groupe de participants ayant évalué le plus positivement leur savoir-coopérer et celui des navettes, et le cluster 2 correspond à ceux qui ont évalué le plus positivement le savoir-faire des navettes.

	ANOVA							
	Cluster		Error		F	Sig.	Cluster Centers	
	Mean Square	dof	Mean Square	dof			Cluster 1	Cluster 2
Perception ¹	28.219	1	0.828	42	34.098	<0.001	6	4
Analysis ¹	50.037	1	0.917	42	54.574	<0.001	6	4
Decision ¹	53.201	1	0.755	42	70.468	<0.001	5	3
Action ¹	10.370	1	1.599	42	6.484	0.015	6	5
Info. Gathering ²	40.268	1	1.303	42	30.913	<0.001	4	6
Conflict detection ²	52.517	1	0.890	42	59.024	<0.001	3	6
Conflict managt ²	52.953	1	0.940	42	56.334	<0.001	3	5
Control of shuttles ²	32.317	1	1.730	42	18.680	<0.001	3	5
Conflict detection ³	41.613	1	0.924	42	45.023	<0.001	3	6
Conflict managt ³	53.062	1	1.159	42	45.795	<0.001	3	5
Authority managt ³	15.016	1	1.123	42	13.371	<0.001	4	6

Figure 43 Résultat de l'ANOVA sur le cluster basé sur le questionnaire de coopération Homme-Machine, avec le centre des clusters (Habib et al. 2021)

En se basant sur la note de savoir-faire donnée aux navettes, il est possible d'observer un résultat significatif pour le score de production entre le cluster 1 et 2 (Figure 44). Les participants ayant accordé les notes les plus positives au savoir-faire des navettes sont ceux ayant atteint les scores les plus élevés. Les participants évaluant le plus positivement leur propre savoir-coopérer et celui des navettes sont ceux ayant ressenti les plus faibles charges de travail, qui ont estimé avoir été suffisamment entraînés, et qui ont évalué l'environnement comme peu complexe. De plus, les participants ayant évalué le plus positivement le savoir-coopérer des navettes sont également ceux ayant le plus utilisé les systèmes d'aide (Figure 44).

Dependent Variables	Average (Std. Dev.)		<i>p</i> -Value (Confidence Level of 95%)
	Cluster 1	Cluster 2	
Score	19,640 (77.11)	14,721 (61.86)	0.026
Workload	71.72 (7.18)	62.09 (16.68)	0.011
Sufficient training	3.85 (1.21)	4.84 (1.27)	0.028
Environment complexity	5.08 (1.44)	4.13 (1.43)	0.044
Use of assistance	0.667 (1.23)	3.21 (5.301)	0.019

Figure 44 Moyenne des résultats des participants par groupe et résultat du test de significativité (Habib et al. 2021)

L'analyse de la composition des clusters nous révèle que la majorité des participants (58%) du cluster 1 (lié au savoir-faire des navettes) avait accès au système d'aide alors que 60% des participant du second cluster n'y avait pas accès. Une grande proportion des participants du cluster 1, soit 46%, estiment jouer fréquemment aux jeux vidéo alors que 45% des participant du cluster 2 n'y jouent presque pas.

Le cluster 1 lié au savoir-coopérer du participant est composé à 54% de participant de la première expérimentation tandis que le cluster 2 est composé à 58% de participants issus de la seconde expérimentation. La majorité des participants du cluster 1 (54%) ne joue presque pas aux jeux vidéo contre 52% de joueurs fréquents dans le cluster 2. Les différences sont faibles mais il est envisageable que dans la seconde organisation où il existe une coopération humain-humain, la coopération avec le système soit reléguée au second plan. Il est également possible que certains opérateurs aient profité du partage de tâche pour accorder plus d'importance à la gestion manuelle des navettes (micro-management) diminuant l'aspect coopératif pour le remplacer par l'aspect fonctionnel (savoir-faire). Ces aspects restent à étudier.

Le cluster 1 lié au savoir-coopérer des navettes, comptabilise 73% d'utilisateurs n'ayant pas eu accès au système d'aide. Le cluster 2 quant à lui comptabilise 62% de participants ayant eu accès au système d'aide. En l'absence des systèmes d'aide, l'opérateur ne dispose que des retours des navettes afin de lier les besoins des produits à des machines spécifiques, ce qui a pu influencer sa perception du savoir-coopérer.

Plusieurs clusters ont également été créés à partir des réponses au questionnaire du NASA TLX. Les différences significatives observées entre les clusters sont liées à l'évaluation de l'exigence temporelle, de l'effort, de la frustration et de la charge de travail globale. Les résultats nous montrent que les participants du cluster 1 ont ressenti une exigence temporelle, une frustration et une charge de travail supérieure aux autres participants,

alors que les participants du cluster 2 ont ressenti un effort supérieur fourni lors de l'accomplissement de la tâche (Figure 45).

	ANOVA							
	Cluster		Error		F	Sig.	Cluster Centers	
	Mean Square	dof	Mean Square	dof			Cluster 1	Cluster 2
Mental demand	5595.01	1	11,782.96	42	0.475	0.495	300.37	323.53
Physical demand	12.379	1	3151.43	42	0.004	0.950	28.15	27.06
Temporal demand	50165.82	1	9693.184	42	5.175	0.028	188.89	258.23
Performance	11409.80	1	9202.148	42	1.240	0.272	187.78	154.70
Effort	35399.12	1	8269.430	42	4.281	0.045	140.37	82.12
Frustration	484020.4	1	5623.052	42	86.078	<0.001	45.18	260.58
Workload	2153.030	1	182.565	42	11.793	0.001	59.38	73.75

Figure 45 Résultat de l'ANOVA sur le cluster basé sur les facteurs pondérés du NASA TLX et la charge de travail, avec le centre des clusters (Habib et al. 2021)

Les résultats du test de significativité Figure 46 font ressortir que les participants du cluster 1 sont ceux notant le plus positivement l'entraînement reçu et donnant l'estimation la plus basse concernant la complexité de l'environnement d'expérimentation.

Dependent Variables	Average (Std. Dev.)		p-Value (Confidence Level of 95%)
	Cluster 1, n = 27	Cluster 2, n = 17	
Sufficient training	5.50 (1.17)	4.19 (1.20)	0.002
Environment complexity	3.67 (1.37)	4.69 (1.45)	0.037

Figure 46 Moyenne des résultats des participants par groupe et résultat du test de significativité (Habib et al. 2021)

L'analyse de la composition des clusters nous révèle que le cluster 1, qui correspond aux évaluations les plus hautes en termes d'exigence physique, de performance et effort, contient de nombreux joueurs réguliers (55%) tandis que le cluster 2 n'en compte que 18%. La majorité des participants du cluster 1 proviennent de la seconde expérimentation (63%). A l'inverse, la majorité des participants du cluster 2 proviennent de la première expérimentation (59%). Pour finir, la majorité des participants du cluster 1 (59%) avaient accès au système d'aide alors que seulement 35% des participants du cluster 2 y avait accès.

4. Conclusion

Dans les deux expérimentations, de nombreux résultats sont non significatifs. Malgré tout, certains résultats intéressants ont pu être mis en évidence. La seconde expérimentation a en partie répondu aux attentes des premiers participants, puisqu'ils ont globalement donné de meilleures notes dans leur évaluation de la coopération avec le système.

De manière synthétique, ces expérimentations ont permis d'identifier certaines conclusions utiles pour la conception de systèmes de coopération humains-machines dans le contexte de l'industrie du futur (Habib et al. 2021) :

- L'expérience en terme de jeux vidéo influence significativement l'utilisation du système d'aide par le participant, les performances du participant dans l'exécution de la production, l'auto-évaluation des compétences du participant en matière de coopération, ainsi que la perception de la charge de travail, de l'exigence temporelle, de la frustration, de l'exigence physique, de l'effort et de la performance.
- Le travail en équipe améliore les performances dans l'exécution de la production en réduisant la consommation d'énergie et la surconsommation. De plus, le travail en équipe améliore l'auto-évaluation par le participant de son savoir-coopérer, ce qui tend à réduire la perception de la charge de travail, de l'exigence temporelle et de l'exigence physique. Cependant le travail en équipe amplifie l'exigence physique et l'effort ressentis.
- Les participants ayant obtenu un plus haut niveau de performance et ayant fait le plus usage du système d'aide sont ceux qui ont évalué leur entraînement comme insuffisant. De plus, ces derniers ont sur-estimé la complexité de l'environnement expérimental en comparaison des autres participants.
- Les participants ayant évalué leur savoir-coopérer avec les notes les plus positives sont également ceux qui ont estimé avoir reçu un entraînement convenable et ont sous-estimé la complexité de l'environnement expérimental par rapport aux autres.
- Les participants ayant fait l'expérience d'une charge de travail, d'une exigence temporelle et d'une frustration plus faibles sont également ceux qui ont estimé

avoir été suffisamment entraîné et qui ont jugé que l'environnement expérimental n'était pas trop complexe. Cependant ces mêmes participants ont fait l'expérience d'une exigence physique supérieure et ont estimé avoir fourni plus d'effort, en plus d'exprimer une satisfaction plus faible vis-à-vis de leur performance.

Une partie des améliorations suggérées par les participants à l'oral et observables dans les écrits libres étaient prévisibles, telle que la possibilité de visualiser la consommation des ressources non pas à travers tout le système de manière générale, mais individuellement par robot de production. En outre il serait sans doute possible d'obtenir des résultats complémentaires et de parfaire la compréhension de la coopération humain-système en approfondissant l'analyse réalisée. Toutes les données de la seconde expérimentation n'ont pas encore été exploitées et seules celles permettant la comparaison des expérimentations ont été présentées. Les données disponibles permettent d'envisager le lancement d'un nouveau cycle d'analyse à l'aide du CWA, notamment parce qu'elles apportent des informations utiles sur la coopération et les stratégies mises en place.

Il est enfin important de noter que notre analyse ouvre la porte à une identification et une extraction de schémas génériques et récurrents (« patterns ») de coopération entre les opérateurs, et entre les opérateurs et les systèmes (Pacaux-Lemoine et al. 2021).

CONCLUSION

Nous avons présenté à la fois l'état actuel de l'industrie et les changements qui s'opèrent progressivement. Ces changements, reposant sur de nombreuses technologies, s'illustrent dans le cadre d'une nouvelle révolution industrielle, nommée l'industrie 4.0. Nous avons présenté non seulement les apports de cette révolution, mais également les défis qui se dressent. Parmi ces défis, le problème de l'intégration du l'humain dans l'industrie a été particulièrement souligné. Nous l'avons présenté comme un problème majeur, en mettant l'accent sur la dépendance du système envers des opérateurs compétents. Cependant, bien qu'il s'agisse d'un défi majeur, nous l'avons également présenté comme une opportunité. Les changements prévus par l'industrie 4.0 contiennent de nombreuses opportunités pour les opérateurs. Ainsi, un développement adapté permettrait non seulement de résoudre le problème de l'intégration de l'opérateur, mais pourrait également consister à déployer les technologies les plus adaptées aux opérateurs.

A ce titre, nous avons présenté l'ingénierie système et l'approche préconisée dans ce cadre pour concevoir de nouveaux systèmes. Cette description des méthodes employées nous a permis de souligner les aspects faisant défaut à ces méthodes, notamment au regard de la spécificité d'un système humain-machine. Nous avons de ce fait abordé la notion d'interaction avec le système, mais aussi présenté des aspects clefs relatifs à la cognition de l'opérateur. Il s'agit des facteurs pouvant avoir un fort impact sur le travail d'un opérateur, voire même causer des incidents s'ils sont négligés. Nous avons à ce titre poursuivi avec une présentation de plusieurs méthodes dites centrées sur l'humain ou dites encore « intégrées ». Ces méthodes ont pour avantage de prendre en compte des caractères propres au « facteur humain ». Cependant, comme de nombreuses méthodes, certaines sont plus adaptées que d'autres pour une situation donnée. Ainsi, nous avons abordé les spécificités de plusieurs méthodes, nous permettant de justifier le choix du CWA dans notre cas d'étude.

Nous avons ensuite appliqué les cinq étapes de la méthodes CWA à notre cas d'étude, sans oublier de préciser les sources de données nous ayant permis d'alimenter notre analyse. La première étape nous aura permis de comprendre plus en détail la composition du système, ainsi que les contraintes s'appliquant sur le système et leur propagation. La

deuxième étape aura décomposé les tâches de décision et permis d'analyser non seulement les facteurs importants dans l'exécution de chaque tâche, mais aussi les conditions dans lesquelles elles surviennent ou peuvent survenir. La troisième étape nous a permis d'étudier les différentes stratégies possibles dans l'exécution d'une tâche. L'absence d'opérateur ayant déjà utilisé un système type 4.0 a cependant rendu cette étape difficile à réaliser, car c'est généralement l'analyse de l'activité d'opérateurs experts qui est utilisée pour identifier ces stratégies. La quatrième étape de l'analyse nous a permis de mettre en avant l'organisation sociale au sein du système. Nous avons donc pu présenter la distribution possible des tâches entre l'opérateur et la machine. La dernière étape traitant des modes de contrôle utilisables par les opérateurs, nous avons présenté notre analyse des compétences employées à travers le système. Nous avons ensuite réalisé une synthèse des données extraites à l'aide du CWA et avons présenté nos propositions pour la conception d'un système type 4.0.

Nous avons poursuivi sur la réalisation d'une plateforme nous permettant de réaliser le système envisagé à l'issue du CWA. Nous avons débuté en soulignant les limites de nombreuses plateformes expérimentales, notamment sur le nombre de critères et technologies pris en compte. Qui plus est, du fait que l'interaction humain-machine est centrale dans le système envisagé, il a fallu prendre en compte des considérations spécifiques à cette interaction. Nous les avons présentées, ainsi que les prérequis technologiques nous permettant de considérer notre plateforme comme un véritable système type 4.0. Une fois les spécifications de la plateforme établies, nous avons présenté l'implémentation de la plateforme HUMANISM. Cette présentation passe à la fois par la structure générale de la plateforme, physique et logicielle, mais également par une description des systèmes déjà existants et intégrés à notre plateforme (SUCRÉ, Arezzo, cellule S.MART). Nous avons à la suite présenté les interfaces réalisées pour la plateforme et plus particulièrement les systèmes d'aide conçus à l'aide des résultats issus du CWA.

Pour finir, nous avons présenté le cadre de nos deux expérimentations, accompagné du protocole et d'une description du déroulement. Les deux expérimentations se sont déroulées différemment pour l'opérateur humain, la première avec un seul opérateur en charge de tout le système, et la seconde avec trois opérateurs en situation de coopération. Les données issues des deux expérimentations ont été présentées et discutées. Il en ressort que bien que de nombreuses données ne soient pas significatives, plusieurs résultats

dignes d'intérêt ont pu être relevés. Afin de les compléter, une analyse finale cherchant à identifier des clusters parmi toutes les données a été réalisée.

Nos travaux, alignés sur ceux de Bainbridge (1983) et de Trentesaux and Millot (2016), ont réaffirmé la problématique croissante de l'humain au sein des systèmes automatisés. Au-delà du rappel de ces problèmes, nos travaux explorent les solutions possibles et certaines contributions proposées dans le but d'améliorer les conditions de travail de l'opérateur humain. Nous avons considéré ces contributions comme des opportunités sur lesquelles s'appuyer, dans le but de réaliser un système centré sur l'humain. Nous avons exploré plusieurs méthodes de conception et souligné leurs caractéristiques principales. Ce faisant, nous avons insisté sur le fait que toutes les méthodes proposées ne sont pas forcément adaptées, même si elles sont nombreuses à prôner la prise en compte du facteur humain. Nous offrons donc à la fois une réflexion sur une problématique centrale dans le domaine industriel et une base sur laquelle pourraient s'appuyer d'autres travaux portant sur cette problématique.

Notre emploi de la méthode CWA sur un système type 4.0 permet à la fois de démontrer l'applicabilité de la méthode sur un système encore incertain et la possible amélioration de la relation humain-machine, mais offre également une base de discussion sur ce qu'est ou devrait être un système type 4.0. La méthode CWA proposant un mécanisme d'itération de l'analyse, les résultats de notre analyse peuvent être réinjectés dans une analyse tierce, critiqués, puis réintégrés dans notre propre analyse dans le cadre d'une amélioration continue. Notre travail dans le domaine est principalement de l'ordre exploratoire, pavant la voie à d'autres analyses et contributions dans le domaine de l'industrie 4.0 centré sur l'humain. Nous proposons par ailleurs à ce titre la contribution d'autres méthodes, afin de compléter l'analyse par le CWA grâce à la prise en compte de critères supplémentaires. En complément de ces analyses, la plateforme développée à partir de notre analyse offre une base adaptable à d'autres projet sur les systèmes de productions centré sur l'humain. Il existe en effet à ce jour peu de systèmes aussi aboutis en termes de couverture des technologies de l'industrie 4.0 et de prise en compte de la coopération humain-machine.

1. Limites

Du fait du faible nombre de participant lors des expérimentations et de la forte contrainte temporelle, il est compliqué de dégager une tendance précise dans les résultats. De plus, notre population comprenait majoritairement des hommes d'une vingtaine d'années. Nous devons envisager la possibilité qu'une population plus nombreuse, plus diverse et moins contrainte par le temps pourrait conduire à des résultats différents.

De plus, l'analyse initiale ne pouvait s'appuyer sur un système 4.0 existant. Bien que le CWA soit adapté à la conception d'un système nouveau, le risque d'erreur commise lors de la conception reste supérieur à celui qui pourrait être observé dans le cadre de l'aménagement d'un système existant. Il est donc important de se montrer critique vis-à-vis de la conception dans le but de consolider le résultat final.

D'un point de vue pratique, nous avons constaté des comportements de la part des utilisateurs qui n'avait pas été anticipés. Certains ont pu être identifiés et leurs impacts sur les résultats ont été limités (voir chapitre 5 : stratégie de production), mais rien ne garantit qu'un autre comportement imprévu ne soit pas passé inaperçu. Il n'est donc pas impossible que certains facteurs permettant de comprendre les résultats restent inconnus à ce jour.

A la suite d'essais ayant eu lieu postérieurement aux expérimentations, un participant nous a également fait part d'un problème que nous n'avions pas considéré : le daltonisme. Notre interface s'appuie en effet sur un jeu de couleur afin de synthétiser certaines informations complexes pour les participants. Si dans notre cas l'impact est limité du fait qu'aucun autre participant n'a rapporté de problème de daltonisme, il est important de considérer ce problème lors d'une application à plus grande échelle. Dans notre situation où le nombre de machines et d'opérations est limité, il reste possible d'adapter le jeu de couleur afin de garder un contraste suffisant pour les participants daltoniens. Cependant, sur un système plus complexe, le nombre de couleurs différentes nécessaire pourrait poser problème.

Pour finir, la totalité des fonctionnalités envisagées n'a pu être implémentées, à la fois à cause d'un problème de temps mais aussi à cause de limitations techniques. Les participants ont su, pour certains, pointer du doigt ces même lacunes, laissant envisager qu'elles ont eu un impact sur les résultats.

2. Perspectives

Ces travaux nous auront permis de mieux cerner ce qui constitue le cœur d'un système type 4.0 et ont produit des informations qui pourront être réexploitées en relançant un cycle d'analyse à l'aide du CWA. De plus, les participants se sont montrés ouverts et enthousiastes, suggérant de possibles améliorations et nous fournissant des informations sur leur façon d'aborder les tâches que nous ne possédions pas. En effet, nous avons abordé dans le chapitre 3 certaines limitations dans notre analyse du fait de l'absence de ces informations. Il est donc maintenant possible d'analyser plus en détail les stratégies employées par les opérateurs afin d'affiner le système développé. L'étude de ces stratégies est importante, car elles influencent à la fois la conception du système et l'entraînement à apporter aux futurs opérateurs. Nous avons par exemple pu identifier des stratégies conservatrices et d'autres plus exploratoires, en fonction des informations mise à disposition des participants. Il est donc envisageable d'initier des changements de comportement en fonction de la situation, par exemple en favorisant les stratégies exploratoires lors des entraînements. A l'inverse, s'il est possible de comprendre la stratégie mise en place par un opérateur, il est possible également de mettre en avant les informations les plus pertinentes pour la stratégie choisie. Cet aspect pourrait influencer la perception par l'opérateur de l'intelligence du système. En plus du CWA, un autre cadre nous semble intéressant, car couvrant certains « angles morts » tels que les différents niveaux d'interaction ; il s'agit du cadre proposé par le modèle de coopération Humain-Machine. Il serait donc possible d'utiliser ce cadre en complément, voire même de chercher à l'intégrer dans le CWA.

La plateforme en elle-même a été conçue pour être modifiée facilement et pour pouvoir intégrer de nouvelles contributions, en plus d'être pour le moment unique dans sa large couverture du domaine. Cela en fait une plateforme de recherche intéressante dans l'optique d'une collaboration avec d'autres laboratoires. L'architecture orientée réseau permet notamment de considérer des interactions distantes ; l'idée d'évaluer l'impact de la latence sur la coopération avec le système a déjà été considérée. De plus, les interfaces et autres moyens d'interactions peuvent être aisément modifiés, permettant à d'autres équipes de travailler également sur l'interaction et la coopération humain-système, sans nécessairement modifier la plateforme elle-même. Il est également possible d'y adjoindre d'autres technologies, permettant d'en tester les bénéfices par rapport à la configuration initiale. Par exemple, les travaux de Sparrow et al. (2021) pourraient permettre d'intégrer

un holon de l'opérateur dans la plateforme, offrant une nouvelle opportunité d'interaction entre la machine et l'opérateur.

Les associations humain-machine présentées par Romero et al. (2016) pourraient également être exploitées dans notre scénario afin de compléter les différents aspects de l'interaction humain-machine. L'assistant personnel intelligent pourrait se révéler particulièrement intéressant à étudier, car la situation serait relativement proche de notre seconde expérimentation, mais en communiquant avec une machine au lieu d'un partenaire humain. A la fois la perception et l'acceptation par l'opérateur de l'assistant pourraient être étudiées. Certaines des autres associations humain-machine requièrent cependant un système véritable et non un micro-monde comme le nôtre. Cela est théoriquement faisable et nous permettrait de regarder si l'utilisation d'un système identique mais réel impacte le comportement des participants.

Pour finir, il est également envisageable de collaborer avec d'autres laboratoires pour étudier la coopération mais à une plus grande échelle. L'industrie 4.0 prône en effet également la globalisation des systèmes, soit l'abolition des frontières géographiques entre les systèmes. Il serait donc envisageable de déployer simultanément plusieurs exemplaires de notre plateforme, opérant indépendamment, mais ayant des objectifs communs. Un mécanisme de négociation pourrait alors être mis en place et des travaux pourraient être réalisés pour assister les opérateurs dans leur communication. La forme finale d'une telle plateforme pourrait impliquer non seulement des opérateurs à la supervision, mais également des techniciens de maintenance qui pourraient intervenir via la réalité virtuelle (systèmes émulés) ou la réalité augmentée (systèmes réels). Qui plus est, le partage d'autorité entre les opérateurs sur les différents systèmes pourrait être envisagé, permettant à un opérateur d'assister un autre opérateur, même sur un système distant au besoin.

BIBLIOGRAPHIE

- Abir N, Zinab A, Mourad T (2019) Industry 4.0 plans. In: 2019 1st International Conference on Smart Systems and Data Science (ICSSD). pp 1–3
- Annett J (2003b) Hierarchical Task Analysis. *Handbook of Cognitive Task Design* 2:17–35
- Annett J, Duncan KD (1967) Task analysis and training design.
- Appelbaum SH (1997) Socio-technical systems theory: an intervention strategy for organizational development. *Management Decision* 35:452–463. <https://doi.org/10.1108/00251749710173823>
- Backlund A (2000) The definition of system. *Kybernetes: The International Journal of Systems & Cybernetics* 29:444–451. <https://doi.org/10.1108/03684920010322055>
- Bainbridge L (1983) Ironies of automation. In: *Analysis, Design and Evaluation of Man–Machine Systems 1982*. Elsevier, pp 129–135
- Bangemann T, Karnouskos S, Camp R, et al (2014) State of the Art in Industrial Automation. In: *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*
- Barbosa J, Leitão P, Adam E, Trentesaux D (2015) Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution. *Computers in industry* 66:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2014.10.011>
- Baxter G, Sommerville I (2011) Socio-technical systems: From design methods to systems engineering. *Interacting with computers* 23:4–17
- Berdal Q, Pacaux-Lemoine M-P, Bonte T, et al (2020) A benchmarking platform for Human Machine cooperation in Cyber Physical Manufacturing Systems. In: Borangiu T, Trentesaux D, Leitao P, et al. (eds) *10th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*. Springer International Publishing, Paris, France
- Berger T, Deneux D, Bonte T, et al (2015) Arezzo-flexible manufacturing system: A generic flexible manufacturing system shop floor emulator approach for high-level control virtual commissioning. *Concurrent Engineering* 23:333–342. <https://doi.org/10.1177/1063293X15591609>
- Bordeleau F-È, Mosconi E, Santa-Eulalia LA (2018) Business Intelligence in Industry 4.0: State of the art and research opportunities
- Brehmer B (1992) Dynamic decision making: Human control of complex systems. *Acta Psychologica* 81:211–241. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90019-A](https://doi.org/10.1016/0001-6918(92)90019-A)

- Carayon P (2006) Human factors of complex sociotechnical systems. *Applied Ergonomics* 37:525–535. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.011>
- Cardin O, Derigent W, Trentesaux D (2021) *Digitalisation et contrôle des systèmes industriels cyber-physiques*, ISTE/Wiley
- Chauvin C, Clostermann JP, Hoc J-M (2008) Situation Awareness and the Decision-Making Process in a Dynamic Situation: Avoiding Collisions at Sea. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 2:1–23. <https://doi.org/10.1518/155534308X284345>
- Cooper R, Foster M (1971) Sociotechnical systems. *American Psychologist* 26:467–474. <https://doi.org/10.1037/h0031539>
- Cruz Salazar LA, Ryashentseva D, Lüder A, Vogel-Heuser B (2019) Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *Int J Adv Manuf Technol* 105:4005–4034. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03800-4>
- Derigent W, Cardin O, Trentesaux D (2020) Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges. *J Intell Manuf.* <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01532-x>
- Dix A, Dix AJ, Finlay J, et al (2003) *Human-computer interaction*. Pearson Education
- Elffers H, Van Der Heijden P, Hezemans M (2003) Explaining regulatory non-compliance: A survey study of rule transgression for two Dutch instrumental laws, applying the randomized response method. *Journal of Quantitative Criminology* 19:409–439
- Endsley MR (1995a) A taxonomy of situation awareness errors. *Human factors in aviation operations* 3:287–292
- Endsley MR (1995b) Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors* 37:32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>
- Endsley MR (2018) Automation and situation awareness. In: *Automation and human performance: Theory and applications*. CRC Press, pp 163–181
- Endsley MR, Kiris EO (1995) The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human factors* 37:381–394
- Ervural BC, Ervural B (2018) Overview of Cyber Security in the Industry 4.0 Era. In: Ustundag A, Cevikcan E (eds) *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*. Springer International Publishing, Cham, pp 267–284
- Fehr E, Schmidt KM (1999) A theory of fairness, competition, and cooperation. *The quarterly journal of economics* 114:817–868
- Ferber J, Weiss G (1999) *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-wesley Reading

- Flach JM (2012) Complexity: learning to muddle through. *Cogn Tech Work* 14:187–197. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0201-8>
- Flemisch F, Abbink DA, Itoh M, et al (2019) Joining the blunt and the pointy end of the spear: towards a common framework of joint action, human–machine cooperation, cooperative guidance and control, shared, traded and supervisory control. *Cogn Tech Work* 21:555–568. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00576-1>
- Flemisch F, Heesen M, Hesse T, et al (2012) Towards a dynamic balance between humans and automation: authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations. *Cogn Tech Work* 14:3–18. <https://doi.org/10.1007/s10111-011-0191-6>
- Ge SS, Cui YJ (2002) Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method. *Autonomous Robots* 13:207–222. <https://doi.org/10.1023/A:1020564024509>
- Giret A, Trentesaux D, Prabhu V (2015) Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems* 37:126–140. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.08.002>
- Gorecky D, Schmitt M, Loskyll M, Zühlke D (2014) Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. In: 2014 12th IEEE international conference on industrial informatics (INDIN). Ieee, pp 289–294
- Grieves M, Vickers J (2017) Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, pp 85–113
- Guerin C, Rauffet P, Chauvin C, Martin E (2019) Toward production operator 4.0: modelling human-machine cooperation in industry 4.0 with cognitive work analysis. *IFAC-PapersOnLine* 52:73–78
- Habib L, Pacaux-Lemoine M-P, Berdal Q, Trentesaux D (2021) From Human-Human to Human-Machine Cooperation in Manufacturing 4.0. *Processes* 9:1910. <https://doi.org/10.3390/pr9111910>
- Habib L, Pacaux-Lemoine M-P, Millot P (2017a) A method for designing levels of automation based on a human-machine cooperation model. *IFAC-PapersOnLine* 50:1372–1377
- Habib L, Pacaux-Lemoine M-P, Millot P (2017b) Adaptation of the level of automation according to the type of cooperative partner. In: 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, pp 864–869
- Habib L, Pacaux-Lemoine M-P, Millot P (2018) Human-Robots Team Cooperation in Crisis Management Mission. In: 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, pp 3219–3224
- Han R, Jia Z, Gao W, et al (2015) Benchmarking Big Data Systems: State-of-the-Art and Future Directions. *arXiv:150601494 [cs]*

- Hart SG (2006) NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In: Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. Sage publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp 904–908
- Helbing D (2012) Social self-organization: Agent-based simulations and experiments to study emergent social behavior. Springer
- Hoc J-M (2000) From human – machine interaction to human – machine cooperation. *Ergonomics* 43:833–843. <https://doi.org/10.1080/001401300409044>
- Hoc J-M (1998) *L'ergonomie cognitive*
- Hoc J-M (1996) *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Presses universitaires de Grenoble
- Hoc JM, Amalberti R (2007) Cognitive Control Dynamics for Reaching a Satisficing Performance in Complex Dynamic Situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 1:22–55. <https://doi.org/10.1177/155534340700100102>
- Hoyles C, Noss R, Adamson R (2002) Rethinking the microworld idea. *Journal of educational computing research* 27:29–53
- Jamieson GA (2003) Bridging the gap between cognitive work analysis and ecological interface design. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp 273–277
- Julien N, Martin É (2021) *L'usine du futur-Stratégies et déploiement-2e éd.: Industrie 4.0, de l'IoT aux jumeaux numériques*. Dunod
- Kilgore R, St-Cyr O (2006) The SRK inventory: a tool for structuring and capturing a worker competencies analysis. In: Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp 506–509
- Kritzinger W, Karner M, Traar G, et al (2018) Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine* 51:1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Kusiak A (2018) Smart manufacturing. *International Journal of Production Research* 56:508–517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Lee J, Davari H, Singh J, Pandhare V (2018) Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters* 18:20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Lee JD, See KA (2004) Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human factors* 46:50–80. <https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.50.30392>
- Leitão P (2009) Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22:979–991. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2008.09.005>

- Leitão P, Restivo F (2006) ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in industry* 57:121–130. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.05.005>
- Likas A, Vlassis N, Verbeek JJ (2003) The global k-means clustering algorithm. *Pattern recognition* 36:451–461
- Madni AM, Madni CC, Lucero SD (2019) Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems* 7:7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
- Manavalan E, Jayakrishna K (2019) A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering* 127:925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Manktelow K, Chung MC (2004) *Psychology of Reasoning: Theoretical and Historical Perspectives*. Psychology Press
- Maskel B (1989) Performance measures for world class manufacturing. *Management accounting* 5:32–33
- Mathews J (1996) Holonic organisational architectures. *Human Systems Management* 15:27–54
- Michon JA (1985b) A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? In: *Human behavior and traffic safety*. Springer, pp 485–524
- Millot P, Roussillon E (1991) Man-machine cooperation in telerobotics: problematics and methodologies. In: *Second France Israël Symposium on Robotics*, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Gif sur Yvette
- 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, Váncza J, Kumara SR (2006) Agent-based systems for manufacturing. *CIRP annals* 55:697–720
- Moray N (1998) Identifying mental models of complex human-machine systems. *International Journal of Industrial Ergonomics* 22:293–297. [https://doi.org/10.1016/s0169-8141\(97\)00080-2](https://doi.org/10.1016/s0169-8141(97)00080-2)
- Moustafa N, Adi E, Turnbull B, Hu J (2018) A New Threat Intelligence Scheme for Safeguarding Industry 4.0 Systems. *IEEE Access* 6:32910–32924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2844794>
- Müller JM, Voigt K-I (2018) Sustainable industrial value creation in SMEs: A comparison between industry 4.0 and made in China 2025. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 5:659–670
- Naikar N (2016) *Work domain analysis: Concepts, guidelines, and cases*. CRC Press
- Naikar N, Moylan A, Pearce B (2006) Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis: concepts, guidelines and case study for control task

- analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7:371–394. <https://doi.org/10.1080/14639220500098821>
- Naudet Y, Guedria W, Chen D (2009) Systems Science for Enterprise Interoperability. In: 2009 International Conference on Interoperability for Enterprise Software and Applications China. pp 107–113
- Negri E, Fumagalli L, Macchi M (2017) A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* 11:939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Pacaux-Lemoine M-P (1998) *Coopération hommes-machines dans les procédés complexes: modèles techniques et cognitifs pour le contrôle de trafic aérien*. PhD Thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
- Pacaux-Lemoine M-P (2020) *HUMAN-MACHINE COOPERATION: Adaptability of shared functions between Humans and Machines - Design and evaluation aspects*. Habilitation à diriger des recherches, Université Polytechnique Hauts-de-France
- Pacaux-Lemoine MP, Debernard S (2002) Common work space for human–machine cooperation in air traffic control. *Control Engineering Practice* 10:571–576
- Pacaux-Lemoine M-P, Flemisch F (2021) Human-Cyber-Physical System Integration (HSI) in Industry 4.0: design and evaluation methods. In: 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, pp 1–6
- Pacaux-Lemoine M-P, Habib L, BERDAL Q, Trentesaux D (2021) Cooperative patterns or how to support Human-Cyber-Physical Systems cooperation. In: IEEE Systems, Man and Cybernetics 2021. Melbourne, Australia
- Pacaux-Lemoine M-P, Trentesaux D, Zambrano Rey G, Millot P (2017) Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach. *Computers & Industrial Engineering* 111:581–595. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.014>
- Pach C, Berger T, Sallez Y, et al (2014) Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields. *Computers in Industry* 65:434–448. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.008>
- Parasuraman R, Sheridan TB, Wickens CD (2000) A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans* 30:286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
- Prabhu VV, Trentesaux D, Taisch M (2015) Energy-aware manufacturing operations. *International Journal of Production Research* 53:6994–7004
- Rasmussen J (1983) Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics* 257–266
- Rasmussen J (1997) Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety Science* 27:183–213. [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00052-0)

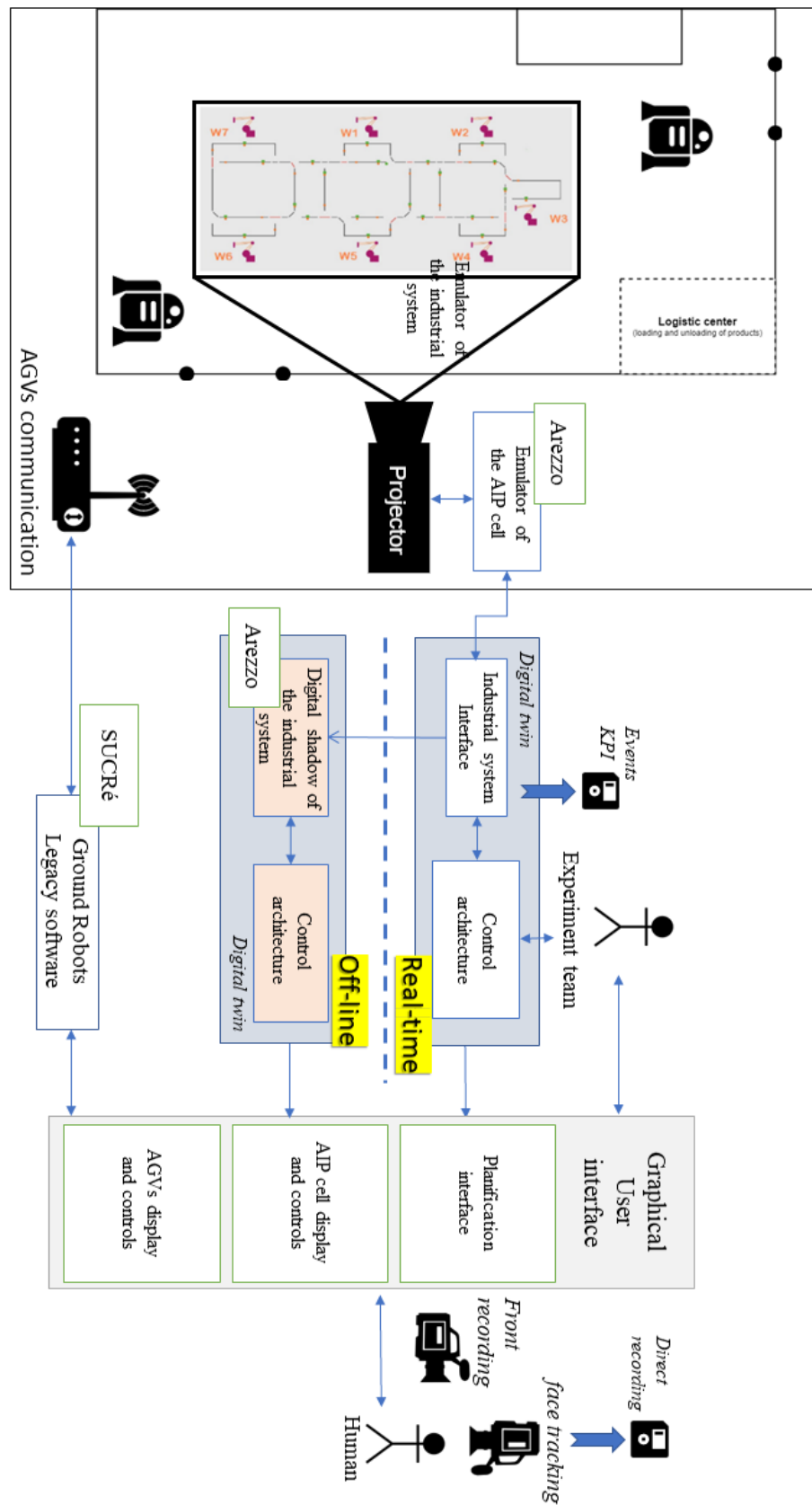
- Rasmussen J, Pejtersen AM, Goodstein LP (1994) Cognitive systems engineering
- Rasmussen J, Pejtersen AM, Schmidt K, others (1990) Taxonomy for cognitive work analysis. Risø National Laboratory Roskilde, Denmark
- Read GJ, Salmon PM, Lenné MG (2012) From work analysis to work design: A review of cognitive work analysis design applications. In: Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp 368–372
- Reason J (1990) Human error. Cambridge university press
- Romero D, Stahre J, Wuest T, et al (2016) Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In: Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46), Tianjin, China. pp 29–31
- Rook FW, Donnell ML (1993) Human cognition and the expert system interface: mental models and inference explanations. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 23:1649–1661. <https://doi.org/10.1109/21.257760>
- Ropohl G (1999) Philosophy of Socio-Technical Systems. Society for Philosophy and Technology Quarterly Electronic Journal 4:186–194. <https://doi.org/10.5840/techne19994311>
- Ross W, Morris A, Ulieru M, Guyard AB (2013) RECON: An Adaptive Human-Machine System for Supporting Intelligence Analysis. In: 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE, Manchester, pp 782–787
- Sacchi W (2004) Socio-technical design. The Encyclopedia of Human-Computer Interaction Berkshire Publishing Group
- Sanz CM, Call J, Boesch C (2013) Tool Use in Animals: Cognition and Ecology. Cambridge University Press
- Schmidt K, Rasmussen J, Brehmer B, Leplat J (1991) Cooperative work: A conceptual framework. Distributed decision making: Cognitive models for cooperative work 75–110
- Scholz-Reiter B, Freitag M, Schmieder A (2002) Modelling and Control of Production Systems based on Nonlinear Dynamics Theory. CIRP Annals 51:375–378. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61540-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61540-6)
- Schultz KL, Juran DC, Boudreau JW, et al (1998) Modeling and Worker Motivation in JIT Production Systems. Management Science 44:1595–1607. <https://doi.org/10.1287/mnsc.44.12.1595>
- Scott AJ (1988) Flexible production systems and regional development. International journal of urban and regional research 12:171–186
- Sheridan TB (2011) Adaptive automation, level of automation, allocation authority, supervisory control, and adaptive control: distinctions and modes of adaptation.

- IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans 41:662–667. <https://doi.org/10.1109/tsmca.2010.2093888>
- Smith (1980) The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. IEEE Transactions on Computers C–29:1104–1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
- Sparrow D, Kruger K, Basson A (2019) Activity Lifecycle Description for Communication in Human-Integrated Industry 4.0 Environments. In: International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer, pp 85–97
- Sparrow D, Taylor N, Kruger K, et al (2021) Interfacing with Humans in Factories of the Future: Holonic Interface Services for Ambient Intelligence Environments. In: Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future: Proceedings of SOHOMA 2020. Springer International Publishing, pp 299–312
- Trentesaux D (2007) Les systèmes de pilotage hétéroarchitecturés: innovations réelles ou modèles stériles? Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA) 41:1165–1202
- Trentesaux D, Caillaud E (2020) Ethical stakes of Industry 4.0. IFAC-PapersOnLine 53:17002–17007. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1486>
- Trentesaux D, Giret A (2015) Go-green manufacturing holons: A step towards sustainable manufacturing operations control. Manufacturing Letters 5:29–33. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2015.07.003>
- Trentesaux D, Millot P (2016) A human-centred design to break the myth of the “Magic Human” in intelligent manufacturing systems. In: Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer series in computational intelligence, pp 103–113
- Trentesaux D, Pach C, Bekrar A, et al (2013) Benchmarking flexible job-shop scheduling and control systems. Control Engineering Practice 21:1204–1225
- Vaidya S, Ambad P, Bhosle S (2018) Industry 4.0 – A Glimpse. Procedia Manufacturing 20:233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Valckenaers P (2019) ARTI Reference Architecture – PROSA Revisited. In: Borangiu T, Trentesaux D, Thomas A, Cavalieri S (eds) Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Springer International Publishing, Cham, pp 1–19
- Van Brussel H, Wyns J, Valckenaers P, et al (1998) Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. Computers in Industry 37:255–274. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(98\)00102-X](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00102-X)
- Vicente KJ (1999) Cognitive Work Analysis: Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work. CRC Press
- Von Bertalanffy L (1972) The History and Status of General Systems Theory. AMJ 15:407–426. <https://doi.org/10.5465/255139>

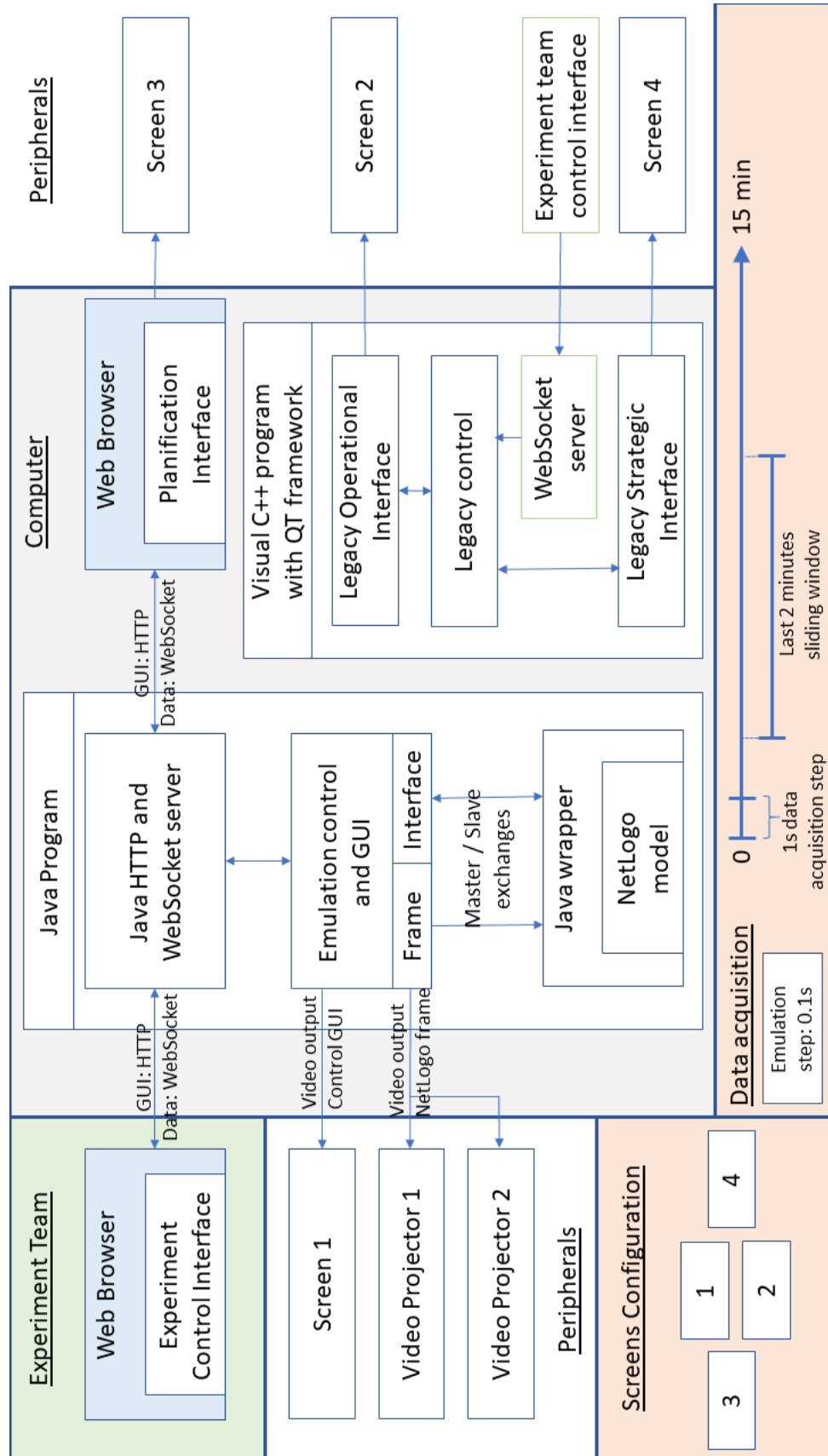
- Weiss G (1999) Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence. MIT press
- Wiendahl H-P, Breithaupt J-W (1999) Modelling and controlling the dynamics of production systems. *Production Planning & Control* 10:389–401. <https://doi.org/10.1080/095372899233136>
- Woodward J (1958) Management and technology. HM Stationery Office
- Woodward J (1980) Industrial organization; theory and practice
- Yao X, Zhou J, Zhang J, Boër CR (2017) From Intelligent Manufacturing to Smart Manufacturing for Industry 4.0 Driven by Next Generation Artificial Intelligence and Further On. In: 2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES). pp 311–318

ANNEXES

ANNEXE 1 SCHEMA DE L'ORGANISATION PHYSIQUE DE LA PLATEFORME HUMANISM	146
ANNEXE 2 SCHEMA LOGICIEL DE LA PLATEFORME HUMANISM.....	147
ANNEXE 3 CONFIGURATION DE LA CELLULE DE PRODUCTION.....	148
ANNEXE 4 PROTOCOLE EXPERIMENTAL LORS DE L'EXPERIMENTATION 1 (GAUCHE) ET DE L'EXPERIMENTATION 2 (DROITE).....	148
ANNEXE 5 LISTE DES QUESTIONS POSEES AUX PARTICIPANTS (HORS NASA-TLX)	150
ANNEXE 6 DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DES CHAMPS DE POTENTIEL	151



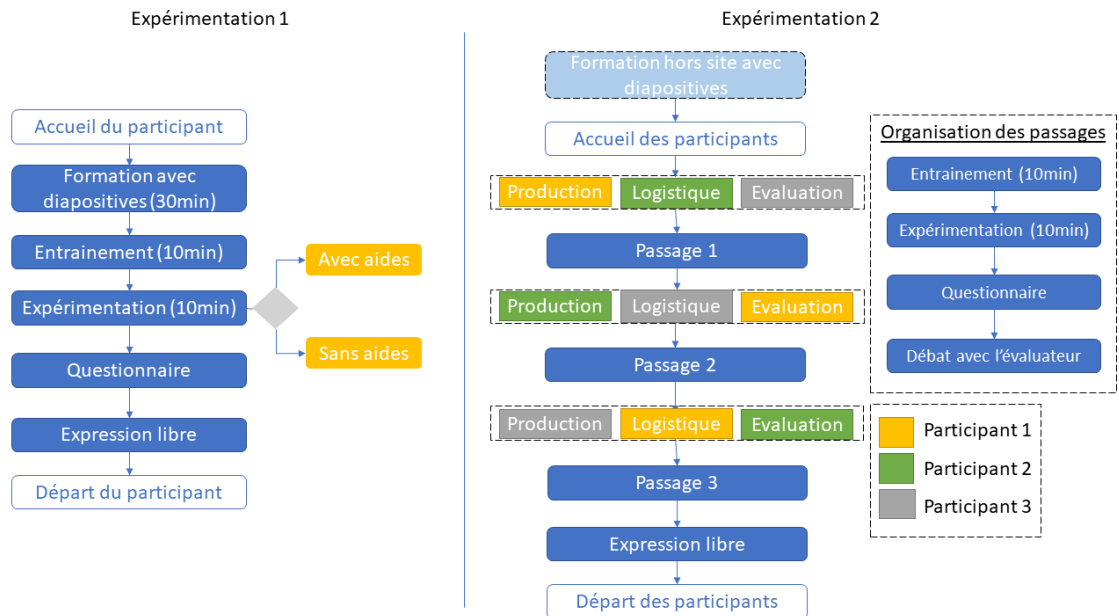
Annexe 1 Schéma de l'organisation physique de la plateforme HUMANISM



Annexe 2 Schéma logiciel de la plateforme HUMANISM

Machine	Opérations (n°)	Durée (s)	Consommation
W1	100 ; 101	10 ; 10	100 ; 100
W2	1 ; 2 ; 4	20 ; 20 ; 20	500 ; 250 ; 475
W3	2 ; 5	20 ; 20	250 ; 100
W4	3 ; 4 ; 5	20 ; 20 ; 20	450 ; 300 ; 100
W5	6 ; 1	5 ; 20	500 ; 375
W6	7 ; 4	20 ; 15	500 ; 450
W7	1	10	500

Annexe 3 Configuration de la cellule de production



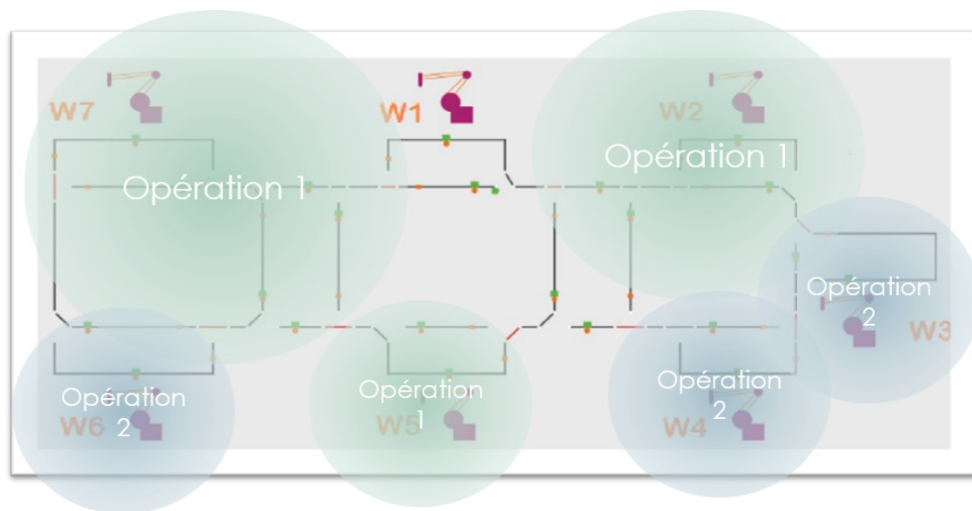
Annexe 4 Protocole expérimental lors de l'expérimentation 1 (gauche) et de l'expérimentation 2 (droite)

Age	
Sexe	
Avez-vous déjà utilisé un robot ou un véhicule télécommandé ? (jamais ; occasionnellement ; parfois ; souvent ; toujours)	
Avez-vous déjà manipulé ou travaillé sur une cellule de production ? (jamais ; occasionnellement ; parfois ; souvent ; toujours)	
Avez-vous déjà joué à des jeux de stratégie et/ou de gestion avant l'expérimentation ? (jamais ; occasionnellement ; parfois ; souvent ; toujours)	
Souhaitez-vous faire partie du classement avec les autres participants ?	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de percevoir la situation ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure d'analyser la situation ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de prendre une bonne décision ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de réaliser l'action correctement ? (1-7)	
A quel point pensez-vous être en mesure d'avoir des informations sur les navettes ? (1-7)	
A quel point pensez-vous être capable de détecter les conflits avec les navettes ? (1-7)	
A quel point pensez-vous être en mesure de gérer ces conflits avec les navettes ? (1-7)	
A quel point vous sentez-vous au contrôle des navettes ? (1-7)	

A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure d'évaluer vos prises de décision ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de détecter les conflits entre leurs décisions et les vôtres ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de gérer ces conflits ? (1-7)	
A quel point pensez-vous que les navettes soient en mesure de gérer l'autorité ? (1-7)	
Pensez-vous avoir été suffisamment entraîné à manipuler la plateforme ? (1-7)	
A quel point diriez-vous que l'environnement était complexe ? (1-7)	
A quel point estimez-vous que les informations fournies vous aient été utiles ? Avez-vous utilisé toutes les informations ou seulement une partie ? (1-7)	

Annexe 5 Liste des questions posées aux participants (hors NASA-TLX)

Le principe de champs de potentiel est une méthode permettant à un ou plusieurs agents de prendre des décisions simples et rapides. En effet, le principe d'un champ de potentiel est comparable à celui d'une enchère, où l'agent sélectionne uniquement l'enchère la plus élevée. Dans le cas d'un système, cette valeur d'enchère sera un agrégat de tous les critères devant entrer en compte lors de la prise de décision. Chaque élément du système émettant une offre lors de l'enchère est responsable du calcul de son enchère, ce qui peut faciliter l'intégration d'un nouvel élément dans le système d'enchère. A l'opposé, cela rend la décision plus floue, car il est impossible de connaître les valeurs derrière l'enchère. Ainsi dans le cas d'un système industriel, à la fois le temps nécessaire à la réalisation et la consommation électrique seront des critères, mais il sera impossible de savoir si l'offre est attrayante grâce à une faible consommation ou à une vitesse de réalisation rapide. De plus, sur le même principe que la propagation d'un champ électromagnétique, l'offre perdra en valeur avec l'éloignement de l'agent. L'agent sélectionnera donc des offres à proximité en priorité mais pourra complètement ignorer des offres certes très intéressantes mais distantes. Chaque champ émis correspond à une offre globale et distincte, et se met à jour dynamiquement en fonction de l'évolution des critères. Une visualisation du principe de champ de potentiel dans le cadre du projet Humanism est fournie dans la figure ci-dessous.



Annexe 6 Description du fonctionnement des champs de potentiel