

Titre: Reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie à l'ère du digital : le cas de l'inspection industrielle
Title: technology to the era of digital : the case of industrial inspection

Auteur: Garrick Cabour
Author:

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Cabour, G. (2023). Reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie à l'ère du digital : le cas de l'inspection industrielle [Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10811/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10811/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Samuel Bassetto, & Élise Ledoux
Advisors:

Programme: Doctorat en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie à
l'ère du digital : le cas de l'inspection industrielle**

GARRICK CABOUR

Département de mathématiques et de génie industriel

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*
Génie industriel

Février 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Cette thèse intitulée :

**Reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie à
l'ère du digital : le cas de l'inspection industrielle**

présentée par **Garrick CABOUR**

en vue de l'obtention du diplôme de *Philosophiæ Doctor*
a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

Mario BOURGAULT, président

Samuel BASSETTO, membre et directeur de recherche

Élise LEDOUX, membre et codirectrice de recherche

Philippe DOYON-POULIN, membre

Guy André BOY, membre externe

REMERCIEMENTS

Il est difficile de mener à bien un doctorat sans s'entourer des bonnes personnes. Et il est encore plus difficile d'exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Mes premières pensées se dirigent naturellement vers mon corps professoral. Je tiens à remercier Samuel Bassetto, mon directeur de recherche, de m'avoir épaulé tout au long de cette aventure. Merci d'avoir cru en moi, de m'avoir offert l'opportunité d'embarquer dans cette aventure et de m'avoir laissé la liberté nécessaire pour aller au bout de ce travail créatif. Ensuite, je ne saurais exprimer ma gratitude pour la personne et chercheuse exceptionnelle qu'est Élise Ledoux, ma codirectrice de recherche. Merci du fond du coeur pour ta confiance, ta patience, tes encouragements, ta disponibilité, tes conseils, tes suggestions toujours généreuses et bienveillantes, ton expertise et ta passion pour l'ergonomie. Tu m'as transmis cette passion depuis la maîtrise et tu m'as donné les outils pour poursuivre au doctorat. Et surtout, tu as su me garder sur le droit chemin quand j'arrivais à nos rencontres avec mes 23 articles "très intéressants" et mes 15 "nouvelles idées". Et ça, c'est pas un exercice facile. Merci encore.

Ensuite, je souhaite remercier les membres de mon jury de thèse d'avoir accepté de lire et corriger cette thèse. Merci à Mario Bourgault d'avoir accepté la présidence de ce travail. Merci à Guy André Boy et Philippe Doyon-Poulin. Je suis très honoré de pouvoir compter sur les figures internationales que vous êtes en ingénierie cognitive dans mon jury et j'espère être à la hauteur. Sur un plan plus personnel, un grand merci à toi Philippe pour tes conseils avisés et les références que tu m'as partagées tout au long de mon parcours.

Un grand merci à MITACS pour avoir financé mes travaux et à toute l'équipe projet MANU 1712. Cette thèse achève pour moi une formidable aventure humaine à vos côtés. Une mention spéciale à Rose-Anne Cusson de m'avoir donné accès au terrain, de m'avoir fait confiance et d'avoir pris le temps de m'expliquer les rudiments de la maintenance aéronautique. Un immense merci aux inspecteurs et autres employés que j'ai pu rencontré à Rolls-Royce. Je ne peux malheureusement vous nommer ici par souci de confidentialité, mais votre bon vouloir et votre patience ont considérablement enrichi les travaux de terrain que j'ai mené.

Ensuite, je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées durant mon parcours académique. D'abord un grand merci à Martin Chadoin et Vanessa Blanchette-Luong. Nos échanges sont toujours très enrichissants autant sur le plan personnel que professionnel. J'espère qu'un jour nos trois noms figureront sur un article scientifique. Une attention particulière

à toute la communauté des ergonomes du Québec. Merci à Nicole Vézina, Denys Denis, Jean-Marc Robert, Patricia Bélanger de m'avoir montré que l'ergonomie c'est plus que des chaises et des bureaux. Merci à toutes les personnes du CIMAR-lab : Rafael Alencar de Paula, Ramy Khalifa, Ahmed Sakr, Abdallah Ben Mosbah, Mathilde Rajon, Justine Schmaltz, Shuma Safar, Samira Namdari et les autres. Merci pour le support moral et les échanges fructueux que nous avons eus. Special thanks to Andrès Morales-Forrero. I learned a lot by your side, especially on concepts that seemed abstract for me at first. Je poursuis avec une pensée toute particulière pour l'espace Thésé-vois et des personnes formidables qui le compose. Ça va être compliqué de quitter ma deuxième maison..!

Il est difficile de continuer cette liste de remerciements sans inscrire les personnes qui ont marqué ma vie au Québec depuis ces huit dernières années, et qui continueront de la marquer. Un gigantesque merci à Cyprien, Mégane, Aloïs, Adrien, les deux Maxime, Geoffrey, les frères Lescureux, Romane, Barry, Simon, Edera et Vincent. Votre bonne humeur, votre soutien continu et vos blagues foireuses m'ont permis de décompresser quand j'en avais besoin et de me donner l'énergie mentale pour aller jusqu'au bout. Je suis content de vous dire que je ne suis (presque) plus étudiant.

Mon avant dernière pensée va à famille, surtout à ma mère, Monique, et ma soeur, Marine. Vous êtes et vous resterez des modèles de résilience, de persévérance et de courage pour moi. Vous m'avez supporté dans ce long parcours académique, sans trop questionner mes choix parfois douteux. Je vous aime fort. Frédéric, j'espère que tu es fier de là-haut.

Enfin un dernier merci et pas des moindres à quelqu'un d'important qui est rentré dans ma vie dernièrement. Merci Laurence pour ta sensibilité, ton écoute et ton soutien dans ce rush final (et même pour la correction des fautes d'anglais de mon *abstract*). Je suis heureux de boucler la boucle à tes côtés.

RÉSUMÉ

Les projets de digitalisation et d'automatisation (DA) posent des défis de développement technologiques certes, mais aussi d'intégration dans les processus et structures organisationnelles des entreprises. En fait, on estime à 30% le taux de réussite des transformations digitales en milieu de travail. La littérature scientifique souligne que les causes potentielles de ces écueils proviennent (1) d'un manque de connaissances sur la variabilité et la complexité des opérations soutenues ou automatisées par ces technologies, et (2) d'un manque d'intégration des facteurs humains et organisationnels en conception. Pourtant, peu d'études explorent comment les équipes projet en DA peuvent aborder simultanément le développement des technologies digitales, l'intégration des facteurs humains et organisationnels et la transformation des situations de travail.

Par le biais d'une recherche exploratoire menée en partenariat avec l'industrie, cette thèse développe plusieurs moyens pour reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie (HT) au sein de projets de DA. Ce travail de recherche s'est construit autour d'un projet réel de maturation technologique visant à automatiser l'inspection industrielle dans le domaine de la maintenance aéronautique. La méthodologie adoptée combine l'étude de cas et la recherche-action en conception (*action design research*). Cette combinaison nous permet de comprendre et d'anticiper les problèmes liés à l'automatisation complète de l'inspection industrielle afin de concevoir des solutions innovantes pour les résoudre.

Plus spécifiquement, ce travail de recherche commence par une analyse approfondie et une modélisation de l'activité d'inspection industrielle dans le système de travail existant, ainsi que des spécificités du projet de R&D (Article 1). Les étapes subséquentes développent des méthodes et moyens d'exploiter ces connaissances en conception, que ce soit pour la maturation des composants logiciels et matériels ou pour la conception des situations de travail futures (Articles 1, 2 et 3). Notre innovation méthodologique met en relation les capacités technologiques, l'activité d'inspection (actuelle et future) et les propriétés du domaine de travail qui, *in fine*, démontrent pourquoi la technologie digitale seule ne répondra pas aux exigences du travail. Elle invite ensuite à reconcevoir le travail d'inspection industrielle dans des logiques de collaboration HT à l'aide de différents outils et méthodes de conception, et ce afin de créer des situations de travail favorables à l'atteinte des objectifs opérationnels (Articles 2 et 3).

Cette thèse contribue à l'avancement des connaissances sur (1) l'activité d'inspection industrielle, (2) le travail interdisciplinaire dans les processus de conception, (3) l'intégration des

facteurs humains et organisationnels dans les projets de DA, et (4) la conception de la collaboration HT. La transférabilité des connaissances produites à partir de cette étude de cas est assurée par le développement d'un modèle conceptuel, d'un cadre de conception et de six principes visant à guider les futurs projets de DA. De plus, cette thèse rend opérationnel le concept de *médiation digitale*. Elle montre comment transformer les données descriptives provenant de l'analyse de l'activité dans le système existant en objets de conception formatifs qui servent de *médiateurs* pour transiter de la situation existante à la situation souhaitée (semi-digitalisée). Nous concluons en soulignant les limites de cette étude et en suggérant quelques avenues de recherches sur la collaboration HT et la médiation digitale.

ABSTRACT

Digitalization and automation (DA) projects pose challenges not only in technological development but also in terms of integration into companies' processes and organizational structures. In fact, the success rate of digital transformations in the workplace is around 30%. The scientific literature emphasizes that the potential causes of these pitfalls stem from (1) a lack of knowledge about the variability and complexity of the operations supported or automated by such technologies, and (2) a lack of integration of human and organizational factors within the design. Yet, few studies explore how DA project teams can simultaneously address the development of digital technologies, the integration of human and organizational factors, and the transformation of work situations.

Through exploratory research conducted in partnership with industry, this thesis develops several means to redesign work in human-automation teaming (HAT) logic within DA projects. This research was built around a real-world technology maturation project aiming to automate industrial inspection in aerospace maintenance. The adopted methodology combines case study and action design research. This combination allows us to understand and anticipate problems related to fully automating industrial inspection to identify and design innovative solutions to solve them.

Specifically, this research begins with an in-depth analysis and modeling of industrial inspection as done in the existing work system, as well as the specifics of the R&D project (Article 1). Subsequent steps develop methods and means to exploit this knowledge within the design, whether for maturing software and hardware components or to conceptualize future work situations (Articles 1, 2, and 3). Our methodological innovation links technological capabilities, inspection activity (current and future), and work domain properties that ultimately demonstrate why digital technology alone will not meet the work requirements. It then invites redesigning the work of industrial inspection from a HAT perspective through different tools and design methods in order to create favorable work situations for achieving operational objectives (Articles 2 and 3).

This thesis contributes to advancing knowledge on (1) industrial inspection as done in real-world settings, (2) interdisciplinary work in design processes, (3) the integration of human and organizational factors in DA projects, and (4) the design of HAT. The transferability of this case study's findings is ensured through the development of a conceptual model, a design framework, and six principles to guide future DA projects. Furthermore, this thesis operationalizes the concept of *digital mediation*. It shows how to transform the descriptive

data elicited from the activity analysis (in the current system) into formative design objects that mediate the transition from the existing to the desired semi-automated situation. We conclude by highlighting this study's limitations and suggesting opportunities for future research on HAT and digital mediation.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xix
LISTE DES ANNEXES	xxi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Éléments de problématiques : actionnabilité des approches de conception so- ciotechniques pour la 4ème révolution industrielle	1
1.2 Plan de la thèse	5
CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE PERTINENTE	7
2.1 Digitalisation et automatisation industrielle	7
2.1.1 Fondements conceptuels	7
2.1.2 Digitalisation et automatisation en maintenance aéronautique	9
2.1.3 Approches structurantes pour la DA	10
2.1.4 Conclusion intermédiaire : Limites du technocentrisme	10
2.2 Perspectives de conception anthropocentrée pour la DA	11
2.2.1 Fondements conceptuels, définitions et motivations	11
2.3 Collaboration humain-technologie à l’heure de la 4RI	16
2.3.1 Introduction	16
2.3.2 Héritage conceptuel et méthodologique de l’ergonomie pour la concep- tion de systèmes humain-machine	17
2.3.3 Vers une relation symbiotique humain-technologie	21
2.3.4 Conception de la collaboration humain-technologie	25
2.4 Analyse du travail pour informer la conception	28

2.4.1	Cadres d'analyse du travail humain	29
2.4.2	Convergences et limites des méthodes descriptives pour la conception	35
2.5	Travail collectif de conception	38
2.5.1	Dimension socio-cognitive de la conception	39
2.5.2	Soutenir le travail collaboratif de conception par les artefacts (objets) de conception et les simulations du travail	41
2.5.3	Du caractère "représentationnel" des artefacts de conception à leur médiation digitale	46
2.6	Synthèse des enjeux et concepts retenus	47
CHAPITRE 3 INTRODUCTION À L'INSPECTION INDUSTRIELLE		49
3.1	Caractérisation de la tâche d'inspection industrielle	49
3.2	Automatisation de l'inspection	53
CHAPITRE 4 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE		55
4.1	Problématique et objectifs de recherche	55
4.2	Contexte du projet de R&D	57
4.3	Démarche générale de recherche	60
4.4	Phase 1 - Construction de l'énoncé initial du problème de conception : étude de l'existant et du contexte de R&D	63
4.4.1	Objet d'étude	63
4.4.2	Cadre méthodologique lié à l'analyse du travail humain et la formalisation des connaissances	64
4.4.3	Collecte et interprétation des données	65
4.5	Phase 2 - Design et Implémentation : Processus de médiation digitale des analyses descriptives en objets de conception centrés sur le dispositif technologique	67
4.5.1	Objet d'étude	67
4.5.2	Collecte et interprétation des données	68
4.6	Phase 3 - Design et Implémentation : Processus de médiation digitale des données issues de l'analyse de l'existant en objets de conception centrés sur les situations de travail futures	69
4.6.1	Objet d'étude	69
4.6.2	Médiation et interprétation des données	70
4.7	Phase 4 - Design : Cadre de conception pour aligner recherche utilisateur et développement de l'IA explicable	71
4.7.1	Objet d'étude	71
4.7.2	Construction du cadre de conception	72

CHAPITRE 5	ARTICLE 1 : ALIGNING WORK ANALYSIS AND MODELLING WITH THE ENGINEERING GOALS OF A CYBER-PHYSICAL-SOCIAL SYS- TEM FOR INDUSTRIAL INSPECTION	73
5.1	Introduction	73
5.2	Methods	76
5.2.1	Research Context (SARA Project)	76
5.2.2	Research Design	76
5.2.3	Data Collection	77
5.2.4	Data Analysis	79
5.2.5	Data Representation : Empirical Modeling	80
5.3	Empirical Findings	80
5.3.1	Industrial Inspection (Sentencing) : WAI and WAD	81
5.3.2	Eliciting Engineering Design and Designers' Needs	85
5.3.3	Visualizing Industrial Inspection for Cyber-Physical-Social System	86
5.3.4	Alignment of Empirical Models with Technological Development	97
5.4	Discussion	100
5.4.1	Diagnosis in Aerospace Industrial Inspection	101
5.4.2	Aligning Fieldwork with Technical Development	102
5.4.3	Design Implications	104
5.4.4	Limitations and Future Work	106
CHAPITRE 6	ARTICLE 2 : TRANSITIONING FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUS- TRY 5.0 IN THE DEVELOPMENT CYCLE : AN ACTION DESIGN RESEARCH IN INDUSTRIAL INSPECTION	107
6.1	Introduction	108
6.2	Related Literature	109
6.2.1	Industry 5.0 and Human-Automation Teaming	109
6.2.2	Manual and Automation-Assisted Industrial Inspection	111
6.3	Research Methodology	112
6.3.1	Case Background	112
6.3.2	Research Approach and Organization of the Paper	113
6.4	Diagnosis Cycle - Supplying the Knowledge Bases to Enrich the Solution Space	114
6.4.1	Methods	115
6.4.2	Results	116
6.5	Design Cycle 1 - Technological Coverage	119
6.5.1	Methods	119

6.5.2	Results	121
6.6	Design Cycle 2 - Human-Automation Work Configurations	125
6.6.1	Methods	126
6.6.2	Results	126
6.7	Discussion and Conclusion	132
CHAPITRE 7 ARTICLE 3 : AN EXPLANATION SPACE TO ALIGN USER STUDIES WITH THE TECHNICAL DEVELOPMENT OF EXPLAINABLE AI . . .		
		137
7.1	Introduction	138
7.2	Background and Motivations	139
7.2.1	Why Explain?	139
7.2.2	What to Explain and How	140
7.2.3	Inferring Explanatory Needs through User Studies	142
7.3	Proposal : User-Centered XAI Framework	144
7.3.1	Methodological Considerations	144
7.3.2	User-Centered XAI Framework	145
7.3.3	Abstracted Explanation Space	149
7.4	Case Study : Aerospace Industrial Inspection	151
7.4.1	Targeted Task and Sociotechnical Context	151
7.4.2	Inspectors' Cognitive Process	152
7.4.3	Exposing Inspectors' Mental Models for the Defect Classification Task	153
7.4.4	User Interface	155
7.4.5	Human-Explainer Agent	155
7.4.6	Classifier Agent	158
7.4.7	Abstracted Explanation Space	158
7.5	Discussion	159
7.5.1	Envisioning Situated End-Use with the AES	159
7.5.2	Cross-Functional Design of XAI-Based Systems	160
7.5.3	About a Generalization to Other Contexts	161
7.5.4	Limitations, Research Avenues and Conclusion	162
CHAPITRE 8 DISCUSSION GÉNÉRALE		
		164
8.1	Objectifs de la thèse et synthèse des résultats	164
8.2	Points de discussion intégrés	166
8.2.1	Inspection industrielle	166
8.2.2	Orchestration d'une médiation digitale axée sur le travail dans un projet de DA	167

8.3	Limites générales de la thèse	172
8.4	Apports théoriques	173
8.4.1	Évolution du modèle conceptuel	173
8.4.2	Principes pour une médiation digitale "axée sur le travail"	177
8.5	Apports méthodologiques et pratiques	182
8.6	Recherche futures	184
8.6.1	Axe 1 : Conception et évaluation de la collaboration HT	184
8.6.2	Axe 2 : Renforcer les espaces de médiation	185
CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		187
RÉFÉRENCES		189
ANNEXES		225

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Synthèse des limites et éléments omis par une approche de conception technocentrée. Tiré et adapté de [1]	12
Tableau 2.2	Les niveaux d'automatisation. Adapté de [2]	19
Tableau 2.3	La liste "Un-Fitts". Tiré de McBride et Hoffman [3]	22
Tableau 2.4	Différences entre les études de la cognition humaine en laboratoire et en milieu naturel. Tiré de <i>Markman</i> [4]	33
Tableau 2.5	Caractéristiques des situations où le cadre de la macrocognition est important pour l'inspection industrielle (adapté de Lee et coll. [5]) . .	34
Tableau 2.6	Décomposition d'une tâche d'inspection. Adpté de [6]	37
Tableau 2.7	Catégorisation des objets de conception utilisée en ergonomie. Adapté de [7].	42
Tableau 3.1	Les quatre décisions possibles selon la théorie de détection du signal. Selon [8]	51
Tableau 3.2	Facteurs affectant la performance de l'inspection. Adapté de [8] et [9].	53
Tableau 3.3	Forces et faiblesses des inspecteurs humains par rapport aux technologies avancées dans la tâche d'inspection industrielle. Traduit de [10] .	54
Tableau 4.1	Niveaux de maturité technologiques (<i>Technology Readiness Level</i>). Tiré de <i>Innovation, Sciences et Développement économique Canada</i>	59
Tableau 4.2	Fondements méthodologiques pour la Phase 1	66
Tableau 5.1	List of observed deviations between WAI and WAD. Only the tasks where deviations were noticed appear in this table	83
Tableau 5.2	Explicit information (needs) requested by designers	85
Tableau 5.3	Decision-making variables processed during diagnosis	89
Tableau 5.4	Empirical models' functions in the design process	103
Tableau 6.1	Deriving functional requirements from inspectors' task	121
Tableau 6.2	Technological coverage	122
Tableau 6.3	Distribution of function types by inspection tasks	122
Tableau 6.4	Technological coverage of the decision-making criteria processed during diagnosis	124
Tableau 6.5	Color-coding schemes of IAT	128
Tableau 6.6	Design decisions made in CFG for critical functions (<i>edge cases</i>) . . .	130
Tableau 7.1	XAI Features	146
Tableau 7.2	User study details	152

Tableau 8.1	Hypothèses de couplage humain-technologie-environnement	176
Tableau 8.2	Exemples de situations d’inspection difficiles/complexes qui peuvent informer la conception de scénarios de simulation	176
Tableau 8.3	Classes de problème et classes de solution	177
Tableau B.1	Diagnosis table showing the technological coverage and type of functions.	227

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Modèle en V de l'ingénierie système avec points d'intégration potentiels avec les extrants d'analyse cognitive du travail. Adapté de [11] et [12]	13
Figure 2.2	Décomposition des chemins possibles pour passer de l'état actuel à l'état future souhaité. Tiré de [13]	14
Figure 2.3	Pyramides AUTOS. Tiré de [14]	15
Figure 2.4	Complémentarité humain-machine et mode de contrôle cognitif. Adapté de [15]	17
Figure 2.5	Illustration de la liste de Fitts tirée du rapport original de 1951 . . .	19
Figure 2.6	Performance optimale (P0) du système humain-machine	21
Figure 2.7	Continuum d'interaction HT. Production personnelle	24
Figure 2.8	Modèle de la situation de travail centré sur la personne en activité. Tiré et adapté de <i>St-Vincent et coll.</i> [16] et <i>Vézina et coll.</i> [17].	31
Figure 2.9	Les contraintes limites le comportement humain mais façonne aussi les potentiels d'actions possibles (affordances). Adapté de [18]	35
Figure 2.10	Golfe de conception et croisement conceptuel avec les méthodes de simulations en ergonomie. Adapté de [13] et [19].	45
Figure 2.11	Modèle conceptuel pour l'enrichissement des méthodes en ergonomie de conception par la médiation digitale. Adapté de [13], [19] et [20]. .	48
Figure 4.1	Objectifs, questions de recherche et articles	57
Figure 4.2	Collaboration planifiée et émergente entre les parties prenantes du projet SARA	58
Figure 4.3	Schématisation de la démarche générale et l'organisation de cette thèse	62
Figure 4.4	Comparatif des méthodes d'élicitation des connaissances selon le type de données souhaitées. Tiré de [21]	65
Figure 4.5	Atelier de process mapping avec un inspecteur	68
Figure 5.1	Overall sequence of industrial inspection (sentencing)	81
Figure 5.2	Relevant tasks (in red) and associated knowledge to elicit and represent according to inferred/explicit design needs	86
Figure 5.3	Systemic Activity Model features (top) and illustration (bottom) of the task <i>interpretation and comparison with standards</i>	88
Figure 5.4	Different part areas for the Fan Blade	91
Figure 5.5	Defect Characterization Model (screenshot). The original diagram contains the 16 defects that could appear on the component concerned	92

Figure 5.6	Decision tree-like model of repair prescription for edge areas	93
Figure 5.7	Information flow of the decision-making phase	96
Figure 5.8	Alignment of empirical insights with the technological development pursued by each design team. Solid lines represent the demonstrated contributions of the models, and dashed lines are the expected ones .	98
Figure 5.9	Triadic role of ergonomists in system design	105
Figure 6.1	The Elaborated ADR cycles based on [22] and [23]	114
Figure 6.2	Knowledge bases that outline the solution space	116
Figure 6.3	Simplified schematic description of inspection at a micro and work system views	117
Figure 6.4	Comparison of human workflow and CPS flowchart with technological coverage	123
Figure 6.5	Extract from the IA of the information gathering task including the upstream operations	127
Figure 6.6	Work-driven anchor for human-automation work configurations . . .	135
Figure 7.1	Overview of our methodical approach to elaborate the framework . .	144
Figure 7.2	Abstracted Explanation Space	150
Figure 7.3	Overall cognitive process - industrial inspection	153
Figure 7.4	Defect attributes, appearance, and expected areas of occurrence for nicks and dents. The attributes in italics with the prefix (*) are those inspectors rely on to distinguish between these two similar kinds of defects.	155
Figure 7.5	Different areas of the Fan Blade	156
Figure 7.6	Contrastive explanation of a type of defect based on SHAP values. The sample image on the left side is an original image taken from the NEU surface defect database [24–26]. The three following images highlight the pixels that positively (red) and negatively (blue) affect the classifier’s decision.	157
Figure 7.7	Abstracted Explanation Space for defect detection, classification, and location tasks in aerospace industrial inspection	158
Figure 8.1	Perspective "axée sur le travail" de la conception et l’implémentation organisationnelle. Adapté de [27]	171
Figure 8.2	Contributions et évolution du modèle conceptuel avec les résultats em- piriques	174
Figure 8.3	Exemple de médiations physique-digitale et digitale-physique	175
Figure 8.4	Bases de connaissances pour l’immersion simultanée	179

Figure 8.5	Le rôle triadique des ergonomes dans la conception des systèmes. Tiré de [28]	180
Figure 8.6	Agrégation des trois pôles dans la configuration des logiques de collaboration humain-technologie	181
Figure E.1	Capture d'écran de l'interface utilisateur actuelle (haut) et recommandations d'amélioration sous forme de maquette basse-fidélité (bas). Cette recommandation propose en outre (1) d'afficher la zone d'apparition du défaut ; (2) de mettre en évidence les défauts <i>borderline</i> qui nécessite une confirmation supplémentaire de l'inspecteur (3) met en évidence les zones de la pièce où aucun défaut n'est autorisé dans les représentations 2D et 3D. De plus, l'affichage des zones du défaut en cours d'examen par SARA (sur la droite) suit le modèle mental des inspecteurs, et les contraintes de réparation de la pièce sont affichées (pas encore faisable avec les capacités technologiques, mais à explorer dans un projet futur).	237
Figure F.1	Protocole d'évaluation sommative mixte sur la base scénarios opérationnels réalistes (Annexe G), d'une étude quantitative (questionnaires - Annexe H) et qualitative (données d'observations avec verbalisation à voix haute)	238

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

4RI	4ème Révolution Industrielle
AES	Abstracted Explanation Space
ADR	Action Design Research
AET	Analyse Ergonomique du Travail
CCU	Conception centrée sur l'utilisateur
CFG	Confirmatory Focus Group
CWA	Cognitive Work Analysis
CPS	Cyber-Physical System
CPSS	Cyber-Physical-Social System
DA	Digitalisation et Automatisation
DA	Decison Automation (article 2)
DMV	Decision-Making Variable
DSR	Design Science Research
eADR	elaborated Action Design Research
EFG	Exploratory Focus Group
EWA	Ergonomic Work Analysis
HPT	High Pressure Turbine
HAT	Human-Automation Teaming
HT	Humain-Technologie
HF	Human Factors
HF&E	Human Factors & Ergonomics
IA	Intelligence Artificielle
IA	Interdependence Analysis (article 2)
IAT	Interdependence Analysis Table
I4.0	Industrie 4.0
I5.0	Industrie 5.0
JAG	Joint Activity Graph
JD	Joint Decision
KE	Knowledge Engineering
LIME	Local Interpretable Model-Agnostic Explanations
LOP	Local Operating Procedures
ML	Machine Learning
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul

MRB	Material Review Board
MC	Modélisation Conceptuelle
NDM	Naturalistic Decision Making
OEM	Original Equipment Manufacturer
RRC	Rolls-Royce Canada
RAC	Recherche-Action en Conception
SARA	Systèmes d'Analyse et de Réparation Automatisée
SAT	Situation Awareness-based agent Transparency
SHAP	SHapley Additive exPlanations
SOP	Standard Operating Procedure
SME	Subject Matter Expert
SVA	Systèmes à base de Vision Artificielle
SySML	Systems Modeling Language
TA	Teaming Alternative
TC	Technological Coverage
TRL	Technology Readiness Level
TSD	Théorie de Détection du Signal
UML	Unified Modeling Language
WAD	Work-As-Done
WAI	Work-As-Imagined
XAI	eXplainable Artificial Intelligence

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Systemic Activity Model with Task Decomposition and Decision Cues	225
Annexe B	Excerpt of functions and technological coverage table	227
Annexe C	Échange d'informations entre inspecteurs et autres opérateurs de maintenance aéronautique	228
Annexe D	Flux logiciel de SARA	235
Annexe E	Exemple de recommandations pour l'interface utilisateur : fenêtre <i>defect viewer</i>	237
Annexe F	Protocole d'évaluation sommative	238
Annexe G	Scénarios opérationnels réalistes pour les évaluations de SARA	239
Annexe H	Questionnaire (1) axé sur le support de SARA sur les opérations d'inspection ; et (2) sur l'utilité et l'utilisabilité des <i>fonctionnalités</i> de SARA	240

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Éléments de problématiques : actionnabilité des approches de conception sociotechniques pour la 4ème révolution industrielle

La transformation digitale, propulsée par la 4ème révolution industrielle en cours (4RI), vise à répondre aux besoins toujours plus grandissants de productivité dans de nombreuses industries. Ces technologies laissent présager un avantage concurrentiel certain en digitalisant la chaîne de valeur, en automatisant des procédés manuels hautement répétitifs ou en capturant des données de production très précises permettant le suivi et l'ajustement des opérations en temps réel [29]. Parmi elles, les plus connues sont l'intelligence artificielle, les objets connectés, les systèmes cyber-physiques ou encore les robots collaboratifs [30]. Il est attendu que la transformation digitale, inscrite dans la 4RI, remodèle fondamentalement la façon dont les individus travaillent dans les systèmes de production [31]. Malgré ces prédictions, le développement technologique est mis en avant au détriment d'une posture de transformation plus systémique qui englobent humains, technologies et contexte organisationnel [32]. La littérature sur les développements technologiques de la 4RI abonde, mais leur mise en oeuvre, les facteurs humains et les transformations opérationnelles qui accompagnent cette digitalisation ne sont que très peu explorés [33].

Cette absence de perspective sociotechnique dans les phases de développements technologiques peut engendrer des conséquences négatives qui se manifestent de différentes manières post-implémentation. Les nouvelles technologies peuvent fournir des capacités innovantes qui semblent répondre aux exigences de travail et à la demande opérationnelle, mais dans la pratique, elles peuvent échouer dans leurs habiletés à supporter l'activité des utilisateurs finaux [13]. Parmi les exemples de ce phénomène, citons la sous-utilisation, la résistance à l'adoption technologique et les temps d'interaction prolongés sur les dossiers médicaux électroniques par les professionnels de la santé (6 heures sur un quart de 11 heures) [34, 35]; l'augmentation de 50% du temps de cycle dans les chaînes de montage hyper automatisées de voiture électrique [36] ou encore les erreurs de diagnostic réalisées par les systèmes à base d'Intelligence Artificielle (IA) comparativement aux diagnostics réalisés par les cancérologues sur la détection de tumeurs [37]. Ces déficiences proviennent d'une méconnaissance des activités humaines et du contexte organisationnel dans lequel ces systèmes automatisés sont déployés [38]. *In fine*, le taux de réussite des transformations digitales est estimé à moins de 30%¹.

1. <https://www.impactfirst.co/4-key-factors-in-digital-transformation-success>

En réponse à ces constats, un consensus se met en place progressivement entre instances gouvernementales, industrielles et académiques pour une transition digitale centrée sur les besoins humains [31, 32, 39–44]. C’est dans cette lignée que l’Industrie 5.0 (I5.0) s’inscrit. Ce paradigme complète la vision de la 4RI qui va au-delà de la productivité "*en mettant spécifiquement la recherche et l’innovation au service de la transition vers une industrie durable, centrée sur l’humain et résiliente*"². Parmi les régulations gouvernementales mises en place, citons les postures de conception anthropocentrées³ adoptées par la Commission Européenne pour la recherche et développement des technologies 4.0 [45] ou la Déclaration de Montréal pour une IA Reponsable [46]. En mettant en avant ces facteurs sociaux et éthiques, l’I5.0 vise à faciliter l’intégration des technologies dans les milieux de travail, aux côtés d’opérateurs humains. Notons que malgré la disparité des définitions de l’I5.0, la ligne directrice concerne une collaboration entre systèmes automatisés et opérateurs humains sur des tâches de travail. Cette collaboration humain-technologie permettrait d’atteindre de meilleurs résultats en combinant les capacités cognitives des humains avec les capacités computationnelles des systèmes intelligents [15].

La rareté des études portant sur l’intégration d’une vision sociotechnique et centrée sur l’humain de l’I4.0 aborde le sujet de deux manières différentes. Un premier champ d’études souligne les avantages potentiels que pourrait apporter l’I5.0 en s’appuyant sur des cas d’application potentiels et en formalisant des pistes de recherches futures [39, 40, 47, 48]. Une deuxième famille d’études se focalise sur la formulation d’architectures conceptuelles (*framework*, taxonomies, principes de conception) pour intégrer humains et technologies dans des logiques de travail collaboratives [15, 49–51] ou pour tenir compte des facteurs humains et organisationnels dans la transformation digitale [13, 32, 51–54]. Ces études constituent une fondation intéressante pour les parties prenantes qui oeuvrent dans des projets d’industrialisation 4.0/5.0. Cependant, les orientations qu’elles fournissent se limitent à des attributs génériques qui ne soutiennent pas convenablement les différents cycles de conception dans les projets de digitalisation.

Malgré un intérêt croissant pour l’I5.0, il est surprenant que si peu de recherches empiriques soient menées sur le sujet. Les cadres et *frameworks* sont générés par conceptualisation déductive uniquement là où une confrontation empirique viendrait confirmer ou raffiner ces modèles. Ce fossé doit être comblé par la génération de connaissances provenant d’études empiriques sur la conception, l’implantation et l’utilisation de technologies 4.0 dans les environnements de travail. Ces résultats sont impératifs pour former une base théorique et pratique solide

2. [Commission Européenne : "Industry 5.0"](#)

3. Approche de conception positionnant délibérément l’opérateur humain et son activité de travail dans la boucle de pilotage, de conception et de supervision du processus cible [14]

pour l'I5.0 [31]. En lien avec le point précédent, la plupart des études empiriques portant sur l'I5.0 sont réalisées en laboratoire avec l'ambition de généraliser les résultats. Ces études expérimentales se focalisent généralement sur des tâches simples pour isoler et manipuler des variables. Cependant, les environnements de travail où seront déployées les technologies 4.0 sont caractérisés par de nombreuses variables et contraintes qui sont difficiles à reproduire en laboratoire, menaçant la validité des conclusions obtenues dans ces études expérimentales [55]. Ainsi, la littérature argumente pour un plus grand nombre d'études en milieux de travail et sur des études de cas industriels.

Lacune de recherche #1 : rareté d'études empiriques visant concrètement l'intégration des facteurs humains et organisationnels dans des projets de digitalisation de la 4RI et avec des cas d'application en milieux de travail.

La recherche sur les facteurs humains dans la 4RI est particulièrement rare : peu d'études ont exploré la manière dont le développement des technologies 4.0, l'intégration des facteurs humains et la transformation des situations de travail peuvent être conduit simultanément [56]. Cette articulation nous paraît intéressante à explorer compte tenu des conséquences négatives engendrées par une perspective technocentrée de la 4RI évoquées plus haut. Cependant, il n'est pas évident d'intégrer une vision centrée sur l'humain et son activité de travail dans des projets technologiques complexes [13, 32]. Et pour cause, les approches, méthodes et outils de conception provenant de l'ingénierie des facteurs humains [57] et de l'ergonomie de l'activité [58] sont limitées dans leurs habiletés à soutenir les cycles d'industrialisation 4.0⁴. Premièrement, les méthodes d'analyse de l'activité et du domaine de travail produisent des données riches sur les dynamiques du système (p ex. exigences opérationnelles et règles métier) dans lequel la technologie va être déployée [58, 59]. Bien que primordial pour s'assurer de la validité écologique de la technologie conçue, ces données descriptives sont rarement utilisables comme telles par les concepteurs de dispositifs technologiques [60, 61]. L'ergonomie de l'activité et l'ingénierie des facteurs humains gagneraient à développer des outils et méthodes qui facilitent le développement et l'utilisation de représentations actionnables du système existant pour soutenir un processus de *médiation digitale* [20] dans les cycles de conception menant aux innovations de la 4RI (développement algorithmique, reconception des situations de travail en équipe humain-technologie). Nous définirons provisoirement la médiation digitale comme les opérations *facilitant la représentation, la traduction, l'exécution et le changement entre les propriétés* [20, p.7] du système de travail existant et futur qui intègre la nouvelle technologie.

4. À noter que dans cette thèse, le terme industrialisation 4.0 est utilisé comme synonyme de digitalisation. De la même façon, l'industrialisation 5.0 renvoie à une approche anthropocentrée de la digitalisation

Lacune de recherche #2.1 : Intégration difficile de données provenant des analyses ergonomiques du travail dans les processus de conception de technologies 4.0

Deuxièmement, le grain d’analyse des approches, méthodes et outils de conception actuels est trop générique et surfacique pour capturer les subtilités des dynamiques de travail existantes. Plusieurs auteurs ont suggéré l’adoption d’un grain d’analyse plus fin, axé sur les situations de travail, pour aligner le développement technologique avec le futur contexte d’utilisation [52, 61–65]. Seulement une poignée d’études fournissent des outils de conception plus fins pour concevoir des situations de travail en équipe humain-technologie (HT) [61, 66, 67]. Cependant, ces objets et artefacts, dans leur configuration actuelle, sont limités dans leurs habiletés à relier les caractéristiques du système existant et celles du futur système de travail qui intégrera le futur dispositif technologique. Ce lien est crucial pour (1) s’assurer de la validité écologique du dispositif technologique, soit son intégrabilité dans les structures et les processus de l’organisation afin de réaliser le changement souhaité [13, 27]; et (2) pour accompagner les transformations sociales et opérationnelles qui entourent les projets d’industrialisation 4.0/5.0 [68, 69].

Lacune de recherche #2.2 : les objets et artefacts de conception actuels ne sont pas consistants avec l’espace-problème de l’I5.0 qui considère simultanément humains-technologie-contexte d’utilisation.

Enfin, peu d’études se sont penchées sur les espaces de conception (*design spaces*) de l’I5.0 [52, 53, 70]. Ce champ d’études est impératif dans un contexte où plusieurs acteurs participent à un processus de conception collaboratif pour couvrir les dimensions techniques, organisationnelles, humaines et sociales de l’I5.0. L’orchestration de cette collaboration multidisciplinaire a été identifiée comme primordiale pour matérialiser les bienfaits anticipés des technologies [20, 55, 70–72]. Cependant, les équipes de conception manquent d’outils, approches et méthodes pour (1) aborder l’espace-problème des projets d’industrialisation 5.0; et (2) pour supporter le travail collaboratif de conception qui s’y déroule, c’est à dire, favoriser l’incorporation d’intrants provenant de courants disciplinaires différents visant à façonner collectivement le futur système de travail. Le développement de nouveaux objets de conception est une piste à privilégier pour structurer le travail collaboratif de conception. Notamment, pour anticiper, concevoir et valider les caractéristiques du futur système de travail en se basant sur les logiques opératoires du système existant, les besoins d’opérateurs humains, la collaboration humain-technologie et les futures capacités technologiques. Cependant, les objets de conception en soi ne sont pas suffisants pour structurer l’activité de conception collaborative. Une animation autour de ces objets devrait aussi être orchestrée [73].

Lacune de recherche #3 : peu de recherche dans le développement d’outils, d’approches et de méthodes soutenant l’activité située de conception multidisciplinaire dans les projets d’industrialisation 4.0/5.0.

Ces lacunes de recherches nous amènent à nous intéresser à la **médiation digitale** de données obtenues via l’analyse ergonomique du travail (AET) pour accompagner les projets d’industrialisation 4.0/5.0. Il nous semble crucial de développer des objets, outils et approches de conception supportant cette médiation digitale pour s’assurer de la validité écologique des technologies de la 4RI. À terme, ils outilleront les équipes de conception interdisciplinaires dans la prise en compte simultanée des facteurs humains, opérationnels, organisationnels et techniques pour optimiser le taux de réussite des transformations digitales.

Ainsi, l’objectif de cette thèse est d’explorer les moyens et possibilités de reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie dans les projets de digitalisation et d’automatisation (DA) industrielle. Nous solliciterons une approche par étude de cas [74] pour explorer et outiller ces moyens, dont l’AET et la médiation digitale font partie. Le cas d’étude en question porte sur un projet de R&D visant à concevoir et implémenter un système semi-automatisé pour supporter une portion du travail d’inspection industrielle de pièces d’aéronef. Ce procédé est actuellement réalisé par des opérateurs entraînés. Les résultats de cette thèse doivent (i) générer des connaissances sur l’activité de travail d’inspection industrielle ; (ii) générer des connaissances sur le processus de médiation digitale mis en place dans notre étude de cas ; (iii) générer des objets, outils et cadres de conception qui supportent les projets d’industrialisation 4.0/5.0 en milieux de travail ; et (iv) contribuer à l’avancée théorique des connaissances sur les approches de conception axée sur le travail.

1.2 Plan de la thèse

Cette thèse est organisée en huit chapitres.

Le **chapitre I** introduit le problème de recherche, les lacunes de la littérature antérieure, l’objectif et le sujet de recherche de cette thèse.

Le **chapitre II** recense les écrits autour de la digitalisation et l’automatisation industrielle, des approches de conception anthropocentrées, de la collaboration humain-technologie, des cadres pour l’analyse du travail humain et la conception en équipe interdisciplinaire.

Le **chapitre III** décrit le domaine sur lequel porte cette thèse, à savoir l’inspection industrielle.

Le **chapitre IV** présente la démarche générale de recherche et le contexte de notre recherche

partenariale. Le chapitre se termine par une courte présentation des articles produits.

Les **chapitres V, VI et VII** présentent les résultats de recherche sous forme d'articles scientifiques.

Le **chapitre VIII** reviendra enfin sur les résultats communs entre ces articles scientifiques, présentera les contributions théoriques et pratiques de cette thèse ainsi que ses limites, puis énoncera des pistes futures de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE PERTINENTE

Cette revue de littérature sera organisée en cinq parties. La première, consacrée à la digitalisation et l’automatisation industrielle, permet de dresser les limites des approches de conception technocentrées et d’introduire les opportunités offertes par des perspectives anthropocentrées dans une deuxième partie. La troisième partie s’intéresse aux principaux concepts, méthodes et outils actuels pour concevoir la collaboration humain-technologie en milieu de travail. Elle finit par spécifier les différentes lacunes théoriques et pratiques qui existent dans ce champ d’études. La quatrième partie dresse un portrait des convergences et divergences méthodologiques des méthodes d’analyse du travail humain qui nous intéressent dans cette thèse. Enfin, la cinquième partie se focalise sur le travail collaboratif dans les processus de conception, en étayant les principes et moyens qui facilitent l’intégration de connaissances multidisciplinaires. Afin d’éviter trop de redondance avec les revues de littérature réalisées dans les articles scientifiques présentés aux chapitres 5, 6 et 7, certains éléments sont abordés de façon succincte dans cette section.

2.1 Digitalisation et automatisation industrielle

Cette section présente brièvement les fondements, leviers technologiques, approches et limites des approches technocentrées pour la digitalisation et d’automatisation industrielle, notamment dans notre domaine d’application : l’inspection qualité. La deuxième partie de cette section permettra de mieux situer l’enrichissement apporté par les démarches de conception anthropocentrée et d’y présenter ces limites.

2.1.1 Fondements conceptuels

La digitalisation et l’automatisation (DA), propulsée par la 4ème révolution industrielle (4RI) en cours, visent à améliorer les processus opérationnels en intégrant un ensemble de technologies digitales, robotiques et automatisées à la production [31]. Dans les secteurs industriels, ces acquisitions technologiques sont motivées par le désir d’augmenter les capacités du système de production que ce soit au niveau de la productivité, de la répétabilité, de la flexibilité, de la surveillance en temps réel ou de la standardisation des processus [30, 75, 76]. En effet, les dernières avancées technologiques de la 4RI, que ce soit au niveau logiciel ou matériel, ont considérablement augmenté les capacités des machines dans la réalisation de tâches cognitives et complexes [77, 78]. Ce phénomène est illustré par le taux d’installations de technologies

robotiques dans le monde qui a plus que doublé entre 2012 et 2020, pour atteindre 383,545 unités à la fin de l'année 2021 [79]. L'amélioration des capacités technologiques s'explique aussi par la possibilité de combiner plusieurs solutions digitales entre elles [76]. C'est d'ailleurs un des éléments qui distingue la 4RI des trois précédentes : elle ne repose pas sur une invention majeure (machine à vapeur, électricité, ordinateur) mais sur un ensemble de principes généraux et la combinaison de différents leviers technologiques ayant le potentiel de créer de la valeur sociale, économique et politique [80]. La 4RI, l'Industrie 4.0 et les technologies 4.0 sont souvent utilisées de manière interchangeable dans la littérature [81], de même que les termes "digitisation", "digitalisation" et automatisation. Bien qu'interreliés, ces termes méritent d'être nuancés [81] :

- Digitisation : processus de conversion de données analogiques (par exemple des images) dans un format digital
- Digitalisation (ou transformation digitale) : l'adoption ou l'augmentation de l'utilisation de technologies digitales ou informatique par une organisation, une industrie, un pays et l'influence sur ces structures organisationnelles
- Automatisation : déploiement de technologies, logiciels et programmes informatiques pour accomplir des tâches précédemment réalisées par des humains [82]
- 4RI : "représente une série de changements significatifs dans la façon dont la valeur économique, politique et sociale est créée, échangée et distribuée. Ces changements de valeurs sont intimement liés à l'émergence de nouvelles technologies qui couvrent les mondes numérique, physique et biologique, et elles sont plus puissantes lorsqu'elles se combinent et se renforcent mutuellement." [80, p.17]
- Industrie 4.0 : Approche stratégique de la 4RI visant à réorganiser la chaîne de valeur autour de plusieurs combinaisons de solutions digitales et principes structurants comme l'interconnectivité et la décentralisation des décisions [30]
- Technologies 4.0 : technologies digitales et ensemble technologiques qui émanent de la 4RI. On y retrouve la réalité augmentée, la fabrication additive, les jumeaux numériques, les systèmes cyber-physiques, l'intelligence artificielle, les systèmes robotiques ou encore l'internet des objets [30].

Il est clair que les trois notions de digitisation, de digitalisation et d'automatisation sont distinctes, mais s'entrecroisent dans les projets de DA [81]. Il est clair aussi que la digitalisation ne peut pas opérer sans une première étape de digitisation des données, moteur de l'économie de la 4RI [80,81]. Une tendance similaire se dégage aussi dans les schémas d'implantation de l'I4.0 [83]. Il est observé que les compagnies industrielles acquièrent en premier lieu les technologies fondatrices qui recueillent, stockent et analysent des données de production (ERP et

capteurs). Une fois stabilisée, la deuxième étape repose sur l’adoption d’un autre ensemble de leviers technologiques pour concevoir, implémenter, automatiser et surveiller les processus opérationnels (semi-)digitalisés (système cyber-physiques, robots, machines autonomes, plateformes numériques) [83,84]. Cependant, il est tout à fait concevable qu’une compagnie adopte certaines technologies 4.0 (par exemple des technologies à base d’intelligence artificielle ou de robots collaboratifs), sans forcément se situer dans un contexte d’industrialisation 4.0. Hormis l’automatisation, on remarque une grande disparité dans la définition et le cadrage conceptuel des termes évoqués plus haut [85]. Tous ces paradigmes ne sont pas encore entièrement stabilisés, cependant nous retenons quelques propositions conceptuelles utiles pour ce travail doctoral. Pour ancrer cette revue de littérature dans notre cas d’étude, la prochaine sous-section présente brièvement les efforts de DA dans le domaine de la maintenance aéronautique à l’ère de la 4RI.

2.1.2 Digitalisation et automatisation en maintenance aéronautique

Dans le domaine aéronautique, la DA influence les activités de R&D, de production ou de maintenance de pièces d’aéronefs [86]. Plus spécifiquement, les récents progrès en analytique de données, et en intelligence et vision artificielle permettent d’améliorer l’efficacité, la répétabilité et la traçabilité des processus d’inspection visuelle des produits dans les activités de production et de maintenance [87–89]. Certains auteurs mettent en avant la fabrication additive, les outils de simulation et la réalité augmentée comme moyen de produire de meilleurs résultats dans les opérations de maintenance aéronautique [90–92]. Pour des applications en inspection visuelle, des systèmes à base de vision artificielle (SVA) sont conçus pour détecter les anomalies présentes sur des composantes d’avions [93–95]. Les techniques d’apprentissage machine sont utilisées en complémentarité des boucles de commande des technologies robotiques pour améliorer grandement les performances des SVA, à condition d’avoir des jeux de données conséquents [89,96]. Ces technologies sont équipées de bras robotique et de caméras avancées pour capturer des images. Ils reposent ensuite sur des algorithmes de traitement d’image pour en extraire des données en vue de prendre une décision informée concernant l’état du composant [97]. Des exemples d’application d’un tel processus sont observables dans les vérifications post-assemblage [97], dans les étapes de détection [89,95] et de classification d’anomalies [98] sur des turbines à gaz. Malgré ces possibilités, des auteurs montrent que l’industrie aérospatiale est plutôt lente dans son processus d’adoption technologique 4.0 comparativement à d’autres industries manufacturières [99]. Les réglementations et certifications strictes, les exigences de sécurité élevées, la maturité des technologies à base d’IA et la culture plutôt conservatrice du domaine font en sorte que l’adoption de l’I4.0 suit une trajectoire incrémentale plutôt que de rupture [86,99].

2.1.3 Approches structurantes pour la DA

Plusieurs approches intéressantes ont été proposées pour favoriser le déploiement stratégique des solutions digitales. Une des plus citées, *Digital Transformation Framework*, prône quatre dimensions clés à considérer pour opérationnaliser une stratégie de transformation digitale [100] : (1) l’exploration de et l’exploitation de nouvelles technologies digitales, (2) l’influence de ce choix technologique sur la création de valeur d’une entreprise, (3) les modifications des structures organisationnelles, processus et formation du personnel qui s’alignent avec la digitalisation, et (4) les aspects financiers qui entourent la transformation digitale. D’autres approches notables structurent ce déploiement autour de niveaux de maturité digitale [81, 83, 101–103], des environnements d’application [104] ou selon les fonctionnalités technologiques [101, 105]. [106] se base sur une revue de littérature des plans d’action (*roadmaps*) existant pour proposer la stratégie suivante : (1) évaluer la maturité digitale de la compagnie, (2) définir l’orienter stratégique de la digitalisation avec des objectifs précis, (3) implémenter la transformation digitale. Nous remarquons aussi que la transformation digitale supporte une vision multidimensionnelle qui intègre les aspects organisationnels, culturels et sociaux [106]. Ce constat est cependant à nuancer pour les systèmes de production ou de maintenance industriels [81]. En effet, l’I4.0 se focalise presque entièrement sur les enjeux technologiques de son déploiement et la définition de son architecture technique [107]. Plusieurs auteurs ont soulignés ce phénomène et contre-argumentés que l’I4.0 est par nature sociotechnique, puisque son intégration est intimement dépendante des autres sous-systèmes de l’entreprise comprenant les ressources humaines [107, 108]. D’autres auteurs s’accordent à dire que le déploiement des technologies 4.0 doit s’accompagner d’une nécessaire réorganisation et restructuration du travail pour matérialiser les bienfaits escomptés [99, 109, 110], et donc passer par des approches sociotechniques de transformation digitale qui adoptent une vision plus holistique [42, 107]. Ainsi, plusieurs principes et démarches sociotechniques ont été proposés pour combler ce fossé [76, 107, 111]. Elles sont structurées autour de trois pôles (1) humains ; (2) technologie ; (3) organisations.

2.1.4 Conclusion intermédiaire : Limites du technocentrisme

Une tendance intéressante se dégage dans la littérature sur la 4RI : bon nombre d’études estiment que l’humain est un atout crucial qui apporte flexibilité et résilience dans les futurs systèmes de production [49, 54, 76, 107, 111–116]. Cependant, peu de recherches proposent réellement des cadres ou approches méthodologiques pour intégrer l’humain et son activité de travail dans le contexte de la 4RI [32, 68, 107, 117, 118]. En effet, le développement de technologies 4.0 s’inscrit dans un courant technocentré [84, 107] ; c’est à dire, une approche qui se

concentre sur le développement technologique en priorité et ensuite cherche des applications potentielles [119]. Les analyses bibliométriques quantifient les directions technocentrées de l'I4.0. En effet, une étude relève que sur un échantillon de 4885 papiers relevés avec une stratégie de recherche comprenant les termes *Industry 4.0* et *Human Factors*, 4849 études se concentrent sur les facteurs techniques et 36 sur les facteurs humains [33]. Cette approche descendante néglige souvent les facteurs contextuels qui gouvernent les systèmes de travail, menaçant la validité écologique [120], l'adéquation tâches-technologie-organisation [121] et l'acceptabilité située [117, 120] des dispositifs technologiques, c'est-à-dire, leurs potentielles intégrations dans des pratiques opérationnelles situées [82]. De plus, le technocentrisme s'accompagne souvent d'une volonté d'automatiser le plus de fonctions possible, et ainsi de réduire l'intervention humaine dans les procédés industriels afin d'améliorer la productivité et la sécurité [14]. Ce phénomène est illustré par les motivations énumérées dans les paragraphes introductifs de la littérature sur l'I4.0 qui vise par exemple à réduire l'intervention humaine [122, 123] ou "l'erreur humaine" [95, 124]. Malgré tout, les technologies 4.0 ne peuvent pas à l'heure actuelle, acquérir et reproduire en intégralité les connaissances tacites, les processus sociocognitifs et les savoir-faire avancés *ancrés dans des décennies d'expérience institutionnelle* [13, p.2]. Elles peuvent cependant supporter ou automatiser certaines tâches dans des scénarios de collaboration humain-technologie, par exemple dans des opérations de collecte et d'analyse d'information propres aux tâches de prise de décision [78]. Le tableau 2.1 recense les limites des approches de conception technocentrée. En réaction à cette vision technocentrée, plusieurs démarches de conception anthropocentrée ont émergé pour replacer au centre de la transformation digitale le grand oublié de la 4RI : l'humain et son activité de travail.

2.2 Perspectives de conception anthropocentrée pour la DA

2.2.1 Fondements conceptuels, définitions et motivations

La DA introduit des défis sociaux et organisationnels dans les entreprises, en plus des défis techniques [31, 107, 118]. Pour surmonter ces défis et assurer une transition réussie vers des situations de travail digitalisés, plusieurs auteurs prônent l'adoption de démarches de conception anthropocentrées [32, 65, 107, 111, 118]. Les démarches de conception anthropocentrées (ou centrée sur l'opérateur humain) sont caractérisées par la volonté de placer l'utilisateur final au centre des processus de conception de produits ou de services [125]. À l'instar des démarches descendantes et technocentrées, elles s'inscrivent dans une philosophie inductive qui consiste à s'imprégner des caractéristiques des utilisateurs et de leur contexte d'usage effectif pour *fonder, informer et inspirer leur processus de développement de produits* [126, p.1].

TABLEAU 2.1 Synthèse des limites et éléments omis par une approche de conception technocentrée. Tiré et adapté de [1]

	Approche technocentrée	Éléments omis par une approche technocentrée
Projet de digitalisation et d'automatisation industrielle	- Amélioration de la performance via l'automatisation du plus de tâches possible - Minimiser l'intervention et l'erreur humaine	- Nouvelle complexité à gérer pour les opérateurs - Écarts avec l'attente des différents acteurs - Implication des opérateurs - Sous-estimation de la variabilité
Travail futur	- Tâches résiduelles confiées aux opérateurs - Vision simplifiée du travail - Mythe de substitution	- Rôles futurs des opérateurs - Transformation du travail - Prise en compte des tâches effectives - Fonctions émergentes du nouveau système - Distribution et interdépendances des tâches
Opérateur	- Dégradant la fiabilité du système - "Humain magique" <i>omniscient</i> et <i>omnipotent</i> vis-à-vis des problèmes interactionnels et opérationnels à venir [14]	- Régulation des fluctuations de l'environnement - Charge de travail - Conscience de la situation - Confiance en la technologie - Acceptabilité et acceptation - Santé, sécurité et satisfaction

Elle est définie comme suit par la norme ISO 9241-210 :2019 [125, p.1] :

"La conception centrée sur l'opérateur humain est une manière de concevoir les systèmes interactifs, ayant pour objet de rendre les systèmes utilisables et utiles en se concentrant sur les utilisateurs, leurs besoins et leurs exigences, et en appliquant les facteurs humains, l'ergonomie et les connaissances et techniques existantes en matière d'utilisabilité. Cette approche favorise l'efficacité et l'efficience, améliore le bien-être de l'humain ainsi que la satisfaction des utilisateurs, l'accessibilité et la durabilité, et réduit les effets néfastes potentiels de leur utilisation sur la santé humaine, la sécurité et les performances."

Toujours d'après la norme ISO 9241-210 (2019), le cycle de conception centrée utilisateur (CCU) comprend les étapes suivantes : (1) comprendre et spécifier le contexte d'utilisation et les caractéristiques des utilisateurs ; (2) spécifier les exigences des utilisateurs vis-à-vis du dispositif projeté ; (3) élaborer les solutions de conception comprenant les tâches de l'utilisateur, l'interaction et l'interface humain-machine ; et (4) évaluer la conception vis à vis de la performance, la satisfaction et la réponse aux exigences. Plusieurs cycles itératifs entre les différentes étapes sont généralement réalisés dans une démarche de CCU.

Les démarches de CCU ne cherchent pas à s’opposer frontalement aux démarches de conception plus traditionnelles. Elles ont au contraire une vocation de complémentarité puisqu’elles visent à intégrer une vision sociotechnique tout au long du cycle d’ingénierie système [11–13]. Par l’intermédiaire de diverses activités de conception que nous verrons par la suite, leur but est de générer des connaissances sur le contexte d’utilisation et les utilisateurs qui guideront et s’incorporeront dans le processus de conception [126]. La Figure 2.1 résume les différents points d’intégration sociotechniques potentiels dans le modèle en V de l’ingénierie système [12]. *Elm et al.* [12] ont illustré comment les démarches sociotechniques peuvent apporter une contribution significative dans les phases de spécification, conception, évaluation et post-déploiement d’un dispositif technologique (Figure 2.1).

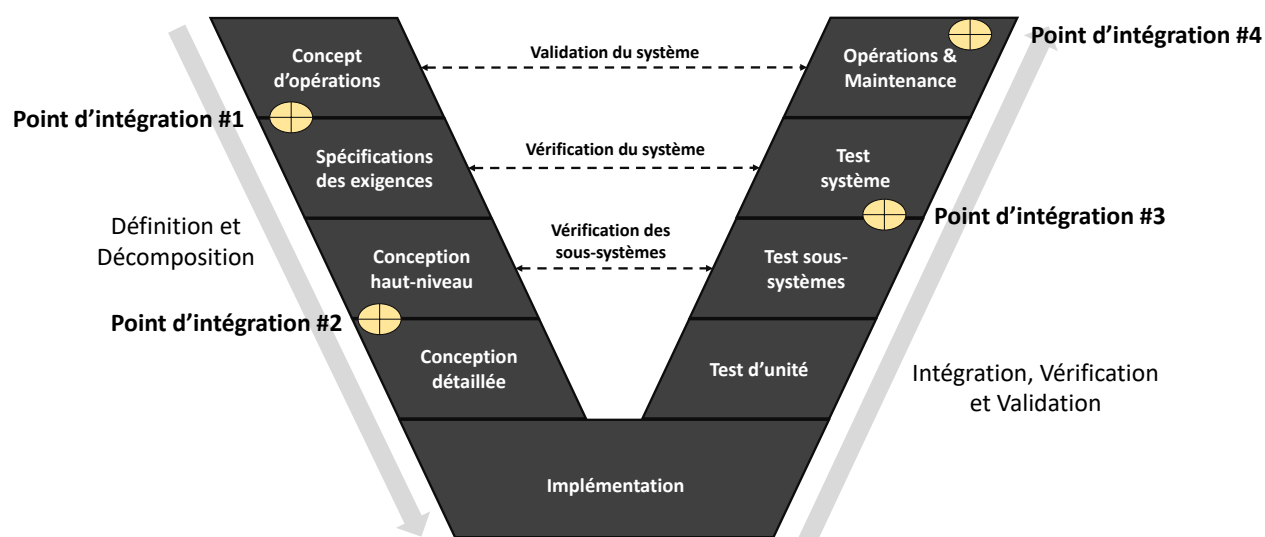


FIGURE 2.1 Modèle en V de l’ingénierie système avec points d’intégration potentiels avec les extrants d’analyse cognitive du travail. Adapté de [11] et [12]

[127] classe ces démarches de (CCU) en quatre catégories :

1. Orientée vers l'utilisateur (*user-centeredness*), ses caractéristiques individuelles (limites cognitives et sensorielles), ses préférences et l'effet d'une conception non adaptée sur sa santé et sa performance (charge mentale) ;
2. Orientée vers le travail (*work-centeredness*) à réaliser dans son futur contexte d'utilisation. Perspective plus macro qui se détache de l'individu et qui vise une *compréhension approfondie du contexte d'usage et le remaniement des pratiques de travail des utilisateurs [avec la technologie] en tenant compte également du contexte politique, organisationnel et culturel* [127, p.7] ;
3. *Participation directe et active* de l'utilisateur tout au long du cycle de conception (idéa-

tion, prototypage et évaluation) [127, p.7]. Renvoie à la notion de démarche participative ;

4. Personnalisation du système aux différents utilisateurs et contextes d'utilisation qui délimitent l'interaction avec le dispositif technologique. Renvoie à l'adaptabilité des systèmes technologiques.

Bien que nous remarquons que les approches ont évolué vers des cadres intégrés qui englobent ces quatre aspects, cette catégorisation conceptuelle relève un ancrage théorique et un objet d'étude différent dans les phases de conception. Par exemple, le centrage sur le travail à l'heure de la 4RI est repris par des courants de recherches qui mentionnent la nécessité d'accompagner la transformation plus ou moins profonde des situations de travail et des structures organisationnelles induite par l'intégration de dispositif technologique 4.0 [13, 27, 128–133]. Nous retiendrons particulièrement l'approche de l'ergonomie de conception dans cette thèse qui postule que l'intégration des dispositifs technologiques dans les milieux de travail doit nécessairement s'accompagner d'une approche concurrente de reconception des situations de travail [58, 134]. Miller et Feigh [13] théorisent cette approche concurrente de conception "axée sur le travail" (*work-driven approach*) en l'opposant aux approches "axées sur la technologie" (*technology-driven approach*). Ils postulent ainsi que l'analyse du système de travail existant sert de passerelle pour imaginer les futures fonctionnalités technologiques. En se basant sur la Figure 2.2, l'état final souhaité est défini selon la nature des futures

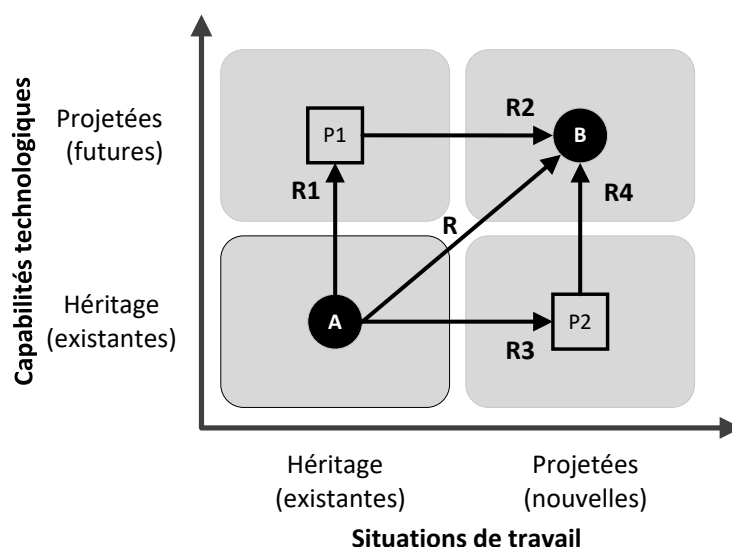


FIGURE 2.2 Décomposition des chemins possibles pour passer de l'état actuel à l'état futur souhaité. Tiré de [13]

situations de travail qui incorporent la nouvelle technologie dans une approche "axée sur le

travail" (P2). Il est possible d'élucider cette future situation de travail à travers différentes méthodes de simulation, de projection et de prospection [11,135,136].

À l'inverse, dans une approche "axée sur la technologie", c'est la projection des nouvelles capacités technologies qui définit l'état final souhaité. Ils soutiennent que la trajectoire P2 est plus propice pour générer de réelles améliorations dans les situations de travail, et ce par l'introduction de nouvelles technologies qui s'alignent avec les exigences du travail et les besoins opérationnels. Avec une trajectoire P1, les opérateurs peuvent avoir de la difficulté à réaliser leur travail avec des technologies qui sont conçues en décalage de leurs réalités opérationnelles. Autrement dit, les technologies peuvent fonctionner sur la base de modèles incomplets ou dépassés qui n'intègrent pas toutes les variables d'une situation de travail [65]. Il en résulte une succession de stratégies de régulation et de contournement par l'opérateur qui souhaite accomplir son travail avec le nouveau support technologique, coûteux autant sur le plan individuel (augmentation de la charge de travail) que sur la performance de l'entreprise (augmentation des délais, résistance au changement technologique) [58,65].

Pour aborder de manière holistique les transformations opérationnelles induites par le déploiement technologique, Boy [82] propose un cadre de référence qui s'articule autour de cinq pôles interreliés dans son modèle AUTOS (Figure 2.3). Les cinq pôles à considérer sont

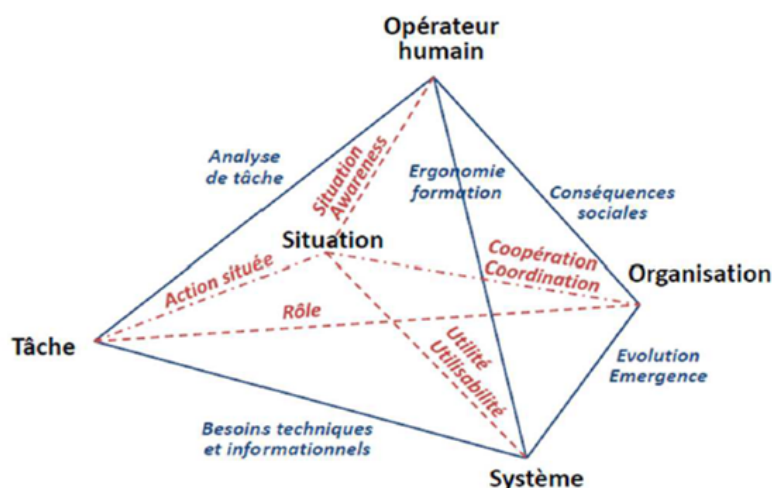


FIGURE 2.3 Pyramides AUTOS. Tiré de [14]

l'Artefact (A ou S pour Système), l'Utilisateurs (U ou Opérateur Humain), les Tâches (T), l'Organisation du travail (O) et les Situations (S) anticipées et non anticipées. Ce modèle met en lumière l'imbrication des pôles entre eux. Ainsi, lors de l'intégration d'un nouveau système technologique (S) va modifier l'organisation existante (S-O) créant de nouvelles tâches

(qu'elles soient anticipées ou émergentes) que doivent exécuter les opérateurs ou la technologie (T-U). Ce changement dans leur travail pourra éventuellement demander adaptation et formation (S-U). Ce cadre est avant tout analytique et souligne la nécessité de considérer le système humain-machine dans son ensemble, soit les aspects humains, techniques et organisationnels qui accompagnent un processus de DA. En effet, le modèle AUTOS nous apparaît pertinent pour approcher de manière systémique les changements induits et la complexité des projets de DA dans le contexte de la 4RI [137].

2.3 Collaboration humain-technologie à l'heure de la 4RI

Dans cette section, après une courte introduction pour contextualiser la réapparition de l'engouement autour de la collaboration humain-technologie (HT), nous présenterons l'héritage méthodologique et conceptuel laissée par l'ergonomie et l'ingénierie des facteurs humains pour construire la relation humain-technologie. Puis nous présenterons les cadres généraux proposés plus spécifiquement dans la 4RI.

2.3.1 Introduction

Ce recentrage sur l'opérateur humain se traduit par différents concepts sociotechniques dans le contexte de la 4RI. On retrouve l'Industrie 5.0 [39], l'intelligence artificielle centrée sur l'humain [138] ou l'intelligence hybride [15], les systèmes cyber-physiques-sociaux ou systèmes humains cyber-physiques [139,140], ou encore les robots collaboratifs ou "cobots" [141]. Ces concepts proviennent d'un consensus émergent qui reconnaît le rôle crucial qu'occuperont les humains dans les futurs environnements opérationnels automatisés et connectés [118,142,143]. Il est impensable que l'expertise humaine et ses fonctions cognitives de hauts-niveaux (comme la fonction de "construction de sens" ou *sensemaking* [144]) soient complètement reproduites par les dispositifs technologiques actuels [13,145,146]. De l'autre côté, les humains disposent aussi de limitations perceptives, cognitives et physiques qui présentent des opportunités d'automatisation ou d'augmentation [47]. Par exemple, la capacité des systèmes automatisés à traiter de large quantité d'information dépasse largement celle des humains [78].

Ce constat amène les communautés académiques et industrielles à développer théories, principes et méthodes pour produire et exploiter des synergies humain-technologie efficaces et efficaces (*Human-Automation Teaming*) [147]. La raison d'être est de tirer profit des capacités diverses et complémentaires des humains et des technologies pour accroître les performances du système via des logiques collaboratives (Figure 2.4) [145,146]. Dans ce paradigme, l'humain est reconnu pour ses capacités d'adaptation et de réponses aux situations anormales.

La technologie permettrait de traiter une grande quantité d'information, de sélectionner et présenter plusieurs cours d'action pour alléger la charge cognitive de l'opérateur humain. Plutôt que de parier sur une automatisation de masse avec peu d'intervention humaine, ce paradigme mise sur une plus grande interaction et collaboration entre les deux entités [39]. Cette collaboration Humain-Technologie (HT) générerait de meilleures performances opérationnelles et permettrait de résoudre des problèmes complexes en allouant efficacement les tâches entre la technologie et les humains [15,148].

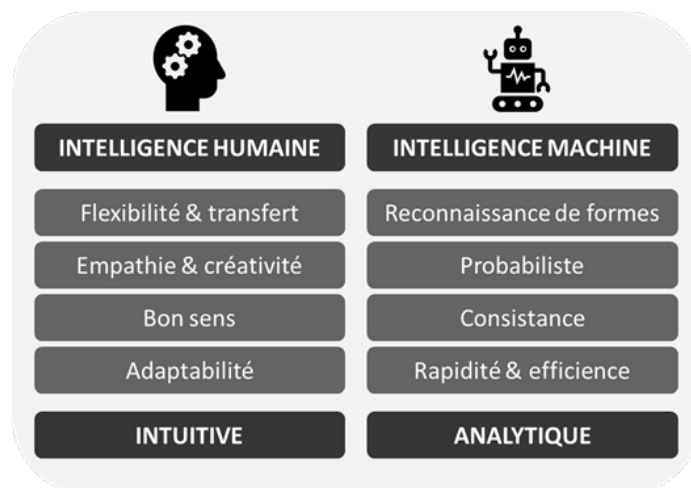


FIGURE 2.4 Complémentarité humain-machine et mode de contrôle cognitif. Adapté de [15]

Ces synergies HT peuvent avoir lieu aux niveaux opérationnels, tactiques ou stratégiques. Cependant, comme le remarque [115], les recherches sur l'I5.0 portent principalement sur l'interaction directe entre opérateurs de plancher et technologies 4.0 (p. ex. robots collaboratifs), plutôt que sur le travail de personnes à un plus haut niveau hiérarchique, p. ex. celui des gestionnaires. Lorsque ce paradigme d'équipe HT prend part dans des tâches de prise de décision, l'appellation utilisée est de "décision conjointe humain-agent" (*joint human-agent decision-making*) [78,149]. Cette perspective est intéressante pour notre étude de cas puisque le travail d'inspection industrielle est caractérisé par une forte dimension cognitive (voir section 3).

2.3.2 Héritage conceptuel et méthodologique de l'ergonomie pour la conception de systèmes humain-machine

La première vague d'automatisation provenant de la révolution industrielle précédente (3ème révolution industrielle) a fait surgir le besoin de conduire des recherches dans l'interaction entre humains et systèmes automatisés, notamment à cause de la survenue d'accidents triste-

ment célèbres [150]. Plusieurs méthodes et modèles ont été proposés pour construire l'interaction humain-machine, dont les plus utilisées sont les tables d'automatisation, l'allocation des fonctions et le modèle de performance des systèmes humain-machine.

Mythe de substitution. Le mythe de substitution décrit la supposition erronée selon laquelle l'automatisation d'une tâche revient simplement à substituer une tâche humaine à un agent logiciel tout en préservant les dynamiques opérationnelles des situations de travail existantes et en *améliorant certaines mesures de sortie* [151, p.2]. Cette supposition ne tient en effet pas compte des modifications qu'engendre l'intégration du dispositif technologique sur le travail à réaliser. Ainsi, les dynamiques opérationnelles sont vouées à changer. Les tâches que réalisaient l'opérateur humain avant la digitalisation peuvent être conservées, modifiées ou supprimées, et d'autres tâches émergeront de l'interaction humain-machine [133, 152].

Allocation de fonctions. L'allocation des fonctions humain-machine est une activité de conception qui consiste à décider si une tâche, dans un futur système de travail, sera distribuée à la technologie, à l'humain ou aux deux entités [153]. Elle est traditionnellement menée à la suite ou pendant la conception d'un système complexe [133]. De nombreuses méthodologies ont été proposées pour réaliser systématiquement cette allocation selon des critères plus ou moins définis. Elles sont d'ordres statiques ou dynamiques [141]. Dans les méthodes statiques, la répartition des fonctions est pensée de manière descendante (*top-down*) autour des forces et faiblesses de chaque entité, et selon une liste prédéfinie de capacités propres à l'humain ou à l'automatisation (Figure 2.5). Dans cette classification "*Machine are better at – Human are better at*" qui remonte aux travaux de Fitts en 1951, les humains ont des capacités d'adaptation importantes et les machines des capacités de traitement de l'information supérieures aux humains. Ainsi, dans cette classification, les tâches requérant de traiter une grande quantité d'informations seront allouées à l'automatisation (Figure 2.5). Malgré les limites de la méthode traditionnelle et les critiques qui lui sont associées, elle reste néanmoins la plus utilisée, ne serait-ce que comme point de départ [154–156]. La première critique majeure adressée aux méthodes statiques concerne leur conception idéaliste et invariable des systèmes de travail [1]. Les contextes opérationnels sont caractérisés par de nombreuses variabilités [157] qu'une vision statique ne parvient pas à capturer et à accommoder. Deuxièmement, il est surprenant de constater que ces démarches d'allocation des fonctions ne commencent pas systématiquement par une analyse du système existant et des situations de travail dans l'environnement de déploiement [133]. Les décisions d'allocation se basent des tâches prescrites et idéalisées sans qu'en amont les concepteurs comprennent "ce qui doit être fait" et les "challenges associés" [133].

Échelles d'automatisation (LoA). Avec l'augmentation des capacités des systèmes auto-

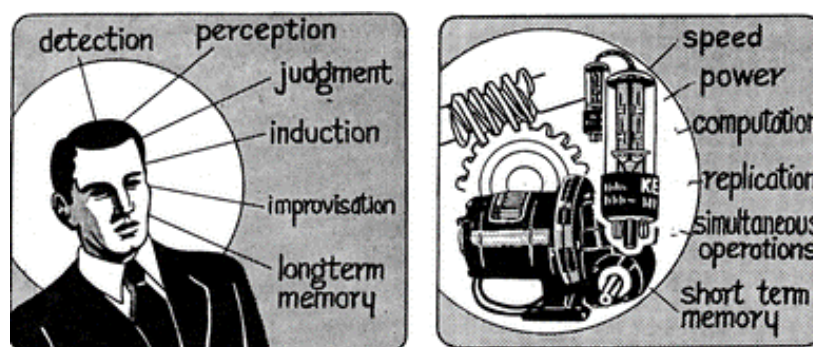


FIGURE 2.5 Illustration de la liste de Fitts tirée du rapport original de 1951

matés et leur déploiement dans les milieux de travail, la littérature scientifique s'est progressivement portée sur la surveillance des processus automatisés par des opérateurs humains (*supervisory control*) [158]. En effet, l'automatisation d'une tâche manuelle modifie sa structure en une *série de tâches cognitives discrètes* qui demande à l'opérateur des efforts de vigilance et contrôle continu plutôt que des actions perceptivo-motrices ou physiques [159, p.14]. Dans ce contexte, les échelles d'automatisation ont émergé pour qualifier les différents niveaux d'automatisation d'une tâche sur un continuum allant de "aucune automatisation" à "complètement automatisé" en y spécifiant le rôle humain à chaque niveau [133]. La plus connue, et la plus utilisée pour différents travaux conceptuels sur l'I4.0 [160], est la table proposée par Parasuraman et coll. [2] (Tableau 2.2).

TABLEAU 2.2 Les niveaux d'automatisation. Adapté de [2]

Niveaux	L'agent logiciel
Haut	10. Décide de tout, agit de manière autonome, et ignore l'humain 9. Informe l'humain que si l'automatisation décide de le faire 8. Informe l'humain que si on le lui demande de le faire 7. Exécute automatiquement la tâche et informe systématiquement l'humain 6. Permet à l'humain de disposer d'un temps limité pour mettre son veto avant l'exécution automatique 5. Exécute son programme si l'humain approuve 4. Suggère une alternative 3. Réduit la sélection à un nombre restreint de choix 2. Offre un ensemble complet de décisions et d'actions
Bas	1. N'offre aucune assistance : les humains doivent prendre toutes décisions et actions

Ces tables d'automatisation ont été appliquées pour déterminer l'effet de plusieurs niveaux d'automatisation sur la performance et la cognition humaine, par exemple sur la charge

cognitive ou la complaisance envers la technologie [161]. Malgré quelques "régularités empiriques" qui caractérisent les performances/comportements humains selon plusieurs niveaux d'automatisation [133, p.3], le grain d'analyse est trop approximatif (*coarse*) pour guider la conception de systèmes humain-machine [62]. Les niveaux d'automatisation produisent des représentations de surface (et simplistes) de l'espace-problème qui délimite la conception de systèmes humain-machine [62, 67, 162]. En conséquence, ces modèles ne fournissent pas suffisamment d'orientation aux concepteurs qui doivent répondre à des questions de conception plus précises, nécessitant à la fois un grain d'analyse plus fin (tâches, sous-tâches et opérations effectives) et systémique (contraintes de l'environnement de travail, interdépendances des tâches) pour organiser le travail entre humains et agent(s) logiciel [62, 133]. De nombreux auteurs mentionnent ainsi le besoin urgent d'étendre les méthodologies de conception actuelles pour assurer la validité et l'utilité des taxonomies d'automatisation pour la conception de systèmes complexes, surtout avec l'avènement de technologies de plus en plus autonomes et complexes [62, 64, 67, 78, 133, 146, 162–164].

Performance du système humain-machine. Selon *Boy* [82], le niveau de performance optimale (P_0) du système humain-machine réside dans plusieurs composantes interreliées : niveau d'automatisation du système, de l'interaction humain-machine, de la performance humaine et connaissance du domaine de travail (Figure 2.6). Ainsi, l'automatisation du plus de tâches possible dans un système ne va nécessairement engendrer une performance plus élevée (P_{TL}). Au contraire, la performance peut décroître si l'automatisation ne s'aligne pas convenablement avec son environnement opérationnel qui comprend les opérateurs humains, leurs activités de travail et les dynamiques opérationnelles. Le niveau P_0 est atteint quand maturité technologique et maturité des pratiques convergent entre elles. Soit quand un niveau d'adéquation tâches-technologie-organisation est atteint par la configuration de situation de travail qui permettent de produire et tirer parti des performances synergiques humain-machine. Plusieurs essais-erreurs sont nécessaires pour atteindre ce niveau optimal sur des scénarios routiniers et imprévus. Enfin, plus les connaissances sur l'environnement opérationnel et les technologies évoluent, plus il est possible d'obtenir des gains de performance par une automatisation accrue (P_{FA}). Ce modèle montre ainsi l'importance des étapes de reconception du travail humain-machine et d'allocation des fonctions sur la performance finale. Il souligne aussi les déperditions associées à des approches "technocentrées" mais aussi à celles "trop anthropocentrées" qui limitent le potentiel d'innovation technologique [14, 165].

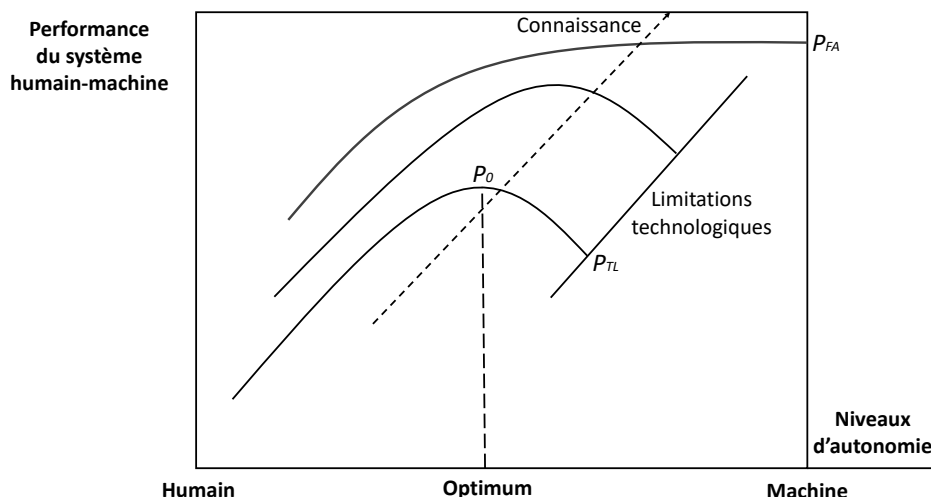


FIGURE 2.6 Performance optimale (P_0) du système humain-machine

2.3.3 Vers une relation symbiotique humain-technologie

Les méthodes traditionnelles en ergonomie et ingénierie des facteurs humains présentées dans la section précédente sont limitées dans leur habileté à modéliser la collaboration HT et le champ d'action possibles pour les concevoir [78, 133, 146]. En effet, ils ne prennent pas en compte le travail à faire et les dynamiques opérationnelles [133], les possibles changements d'état du système [78, 166], les liens d'interdépendances entre les tâches [67], les tâches conjointes humain-machine [167], ou encore les facteurs contextuels extérieurs à l'équipe humain-machine qui influencent la manière dont le travail est réalisé [168, 169]. Pour réellement développer une vision systémique des équipes humain-machine, l'humain et l'automate doivent être considéré comme un tout commun et la technologie ne doit pas être vue comme externe à l'humain [170]. Cette idée reprend les principes phares de la cybernétique pour poser les théories d'une relation humain-machine symbiotique [171, 172], aussi appelé systèmes cognitifs conjoints (*joint cognitive system*) [170]. Pour souligner cette vision symbiotique humain-machine, McBride et Hoffman [3] ont élaboré une « Un-Fitts list » qui met en avant les besoins de chaque entité (humain et technologie) et leurs capacités complémentaires (Tableau 2.3). *Hoc et coll.* [173, p.4] souligne cet enjeu comme suit :

La tâche de l'opérateur ou celle de la machine peuvent n'avoir aucun sens si on les considère isolément l'une de l'autre. Il faut plutôt considérer la tâche de l'ensemble du système homme-machine, décomposée dynamiquement en sous-tâches ou fonctions distribuées parmi les agents humains et artificiels qu'il faut finalement intégrer.

TABLEAU 2.3 La liste "Un-Fitts". Tiré de McBride et Hoffman [3]

Automation	
Are constrained in that	Need people to
Sensitivity to context is low and is ontology-limited	Keep them aligned to context
Sensitivity to change is low and recognition of anomaly is ontology-limited	Keep them stable given the variability and change inherent in the world
Adaptability to change is low and is ontology-limited	Repair their ontologies
They are not “aware” of the fact that the model of the world is itself in the world	Keep the model aligned with the world
Humans	
Are not limited in that	Yet they create machines to
Sensitivity to context is high and is driven by knowledge and attention	Help them stay informed of ongoing events
Sensitivity to change is high and is driven by the recognition of anomaly	Help them align and repair their perceptions because they rely on mediated stimuli
Adaptability to change is high and is goal-driven	Affect positive change following situation change
They are aware of the fact that the model of the world is itself in the world	Implement their preferences for changing the world

Cette citation de *Hoc et coll.* [173] résonne avec la notion de congruence fonctionnelle [174], plus récemment appelée interdépendance dans la littérature [61]. Les tâches ne sont pas seulement assignées aux différentes entités du système. Les relations de dépendances entre celles-ci sont étudiées, de même que les possibles interférences, les besoins de coordination et les possibles redistributions en fonction des besoins actuels de la situation [173–175]. Une décomposition fonctionnelle du travail doit guider la réalisation de cette étape [67, 133, 176]. Cette mise à plat du travail fait apparaître les tâches, les exigences opérationnelles, les ressources et compétences nécessaires pour l’action (quelles soient matérielles ou informationnelles) ainsi que des éléments de variabilité [1, 66, 133, 152, 176]. En agissant de la sorte, le travail qui tend à être automatisé est mis à plat et assure l’identification des exigences fonctionnelles nécessaires pour chaque tâche [176]. Afin de parvenir à relever le défi que pose la relation symbiotique humain-machine, il est nécessaire que les entités (humaines et artificielles) disposent des caractéristiques suivantes :

- « Observabilité » : leur état est visible ; leurs actions et intentions sont claires. La tâche que réalise l’entité, le niveau de progression et les difficultés rencontrées aussi [177]
- Les entités partagent un référentiel opérationnel commun [3] (aussi appelé modèle mental partagé dans la littérature [178]) ; soit des connaissances mutuelles sur la situation de travail, leurs savoirs respectifs, les règles opérationnelles, ainsi que les tâches, les li-

mites (et ses propres limites) et les rôles de chacun. Il s'agit d'une base de connaissance commune utile pour l'action et la reconnaissance d'action et d'intention de l'autre [177].

- « Prévisibilité » : les actions des entités sont suffisamment prévisibles pour que les autres puissent s'y fier pour leurs propres actions/opérations [67]
- « Modalités d'exécution coordonnées » *sur le plan du déroulement et du contrôle des actions, en intégrant des compatibilités temporelles et spatiales* [179, p.2]. Cela comprend aussi la nécessité de divulguer au bon moment et dans le bon format les besoins informationnels de chaque entité [152].
- « Dirétabilité » : capacité des entités, humains et automates, à influencer le comportement de l'autre [67]

L'opérationnalisation de telles caractéristiques n'est pas encore possible avec les capacités technologiques actuelles [180]. De plus, les moyens à mettre en oeuvre pour rendre tangible certain de ces principes soulèvent des questions éthiques et sociétales qui sont loin d'être résolues [181]. Cependant, ces caractéristiques proposent quelques assises conceptuelles sur lesquelles concepteurs et chercheurs peuvent se baser pour proposer des approches innovantes qui favorisent une collaboration HT réussie.

Continuum d'interaction entre humain et technologie

On remarque un certain continuum dans l'interaction qui peut exister entre un humain et une technologie : d'une simple interaction unilatérale à de la coopération, du "couplage" (*teaming*) ou de la collaboration active [78, 173]. Plusieurs critères existent pour classifier les formes de collaboration HT : degré d'interaction dans la réalisation des tâches [182], contributions des deux entités [183], rôle de l'opérateur humain [1, 184] et du robot [1], type d'application [185] ou encore caractéristiques physiques du dispositif technologique [186] (bras robotique, exosquelettes etc.). Un schéma limitant qu'on relève dans la littérature portant sur la 4RI est que la classification du type d'interaction dépend du type de tâches : physique ou cognitive. Ainsi, dans un système cobotique, la classification est déterminée selon le degré de participation actif des deux entités sur la partie observable du travail, c'est-à-dire, sur les gestes, mouvements et postures. Plus récemment, certains auteurs ont ajouté une dimension cognitive dans leurs cadres conceptuels en définissant le degré d'autonomie du robot dans les phases de traitement de l'information [187]. Cependant, le rôle de l'humain dans la dimension cognitive est absent. Nous estimons que cette limitation provient d'un ancrage fort des technologies robotiques dans des tâches manuelles, par exemple de *pick and place* [188]. Cette vision est renforcée par des recherches très citées qui catégorisent les interactions humain-machine selon

le type de technologie utilisée [189]. Ainsi, un opérateur qui utilise une technologie de réalité augmentée tombe dans la typologie d'interaction cognitive avec la mention "d'opérateur augmenté". Un opérateur qui utilise un cobot tombe dans la typologie d'interaction physique avec la mention "d'opérateur collaboratif". Encore une fois, le choix des leviers technologiques prescrit un cadre à suivre dans une vision très descendante. Le travail supporté par ce déploiement technologique est absent des phases initiales de conceptualisation. Ce continuum d'interaction HT dans la dimension physique du travail est représenté dans la partie basse de la Figure 2.7.

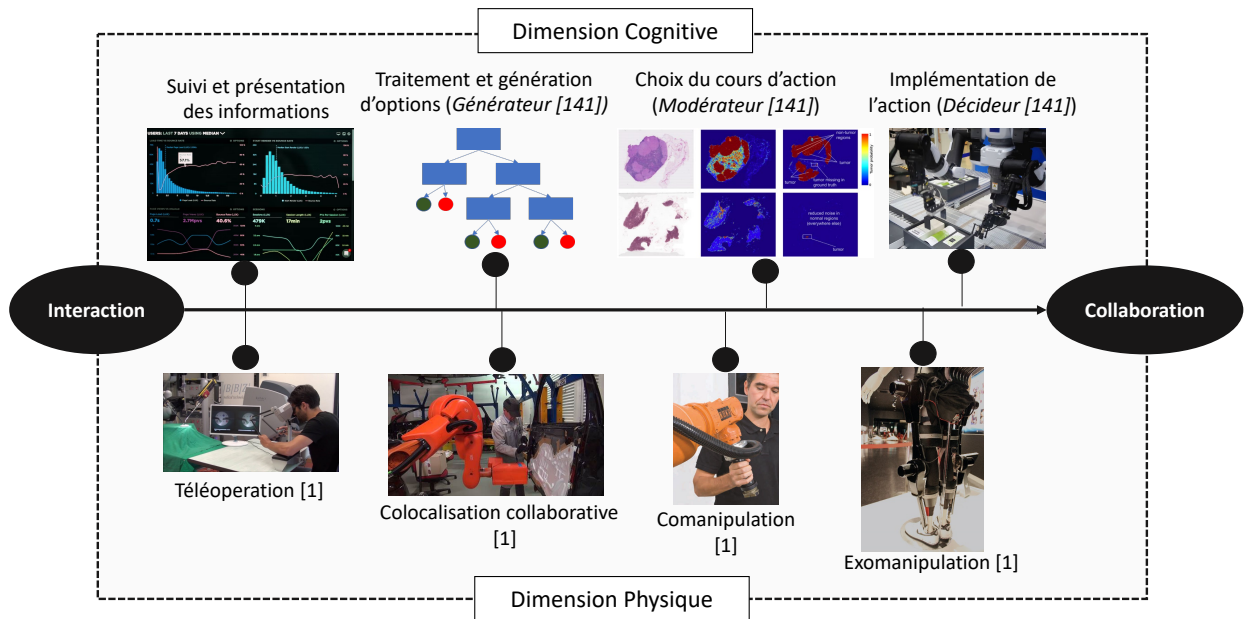


FIGURE 2.7 Continuum d'interaction HT. Production personnelle

Pour des tâches à forte dimension cognitive, le continuum d'interaction est déterminé selon les actions réalisées par l'humain ou la technologie dans le processus de traitement de l'information [2] : suivi et présentation des informations, traitement et génération d'options, choix du cours d'action et implantation de l'action [159, 190]. Ainsi on retrouve, les rôles suivant pour qualifier le continuum d'interaction : générateur, modérateur ou décideur [190]. Plus récemment, *Endsley et coll.* ont complété ces listes en spécifiant les différents rôles possibles de l'humain et de la technologie à chaque étape de traitement de l'information donnant lieu à 12 scénarios possibles : aide à la décision, support à la conscience de la situation, prise de décision mixte, aide à la l'exécution de la tâche etc. [159]. Ainsi, dans un scénario de prise de décision mixte, la technologie recueille l'information, génère des options parmi lesquelles il sélectionne la plus adéquate. L'humain derrière peut valider ou invalider la décision qui est exécutée à nouveau par la machine. D'autres schémas de classification existent pour structu-

rer les formes de collaboration HT dans des tâches de décision. La nature de la collaboration est dite parallèle ou sérielle avec des initiatives mixtes provenant des deux entités (humain ou technologie) [159, 191]. Dans une logique parallèle, l'humain et la technologie traitent différents éléments de la décision en simultanée. Dans une logique sérielle, il existe un flux décisionnel qui se nourrit des sorties de la décision en amont et fournit des données de sortie pour l'étape en aval. Ce continuum d'interaction HT dans la dimension cognitive du travail est représenté dans la partie haute de la Figure 2.7.

Van Diggelen et coll. [192–194] ont proposé une approche unifiée par représentation graphique appelée *team design patterns*. Leur travail conceptuel permet de faire le pont entre le "cognitif et le physique". La collaboration en équipe HT est déterminée non selon la technologie ou les tâches, mais selon les objectifs à atteindre, le travail commun requis (*joint work*) et les aspects de communication. Cette idée est soutenue aussi par plusieurs études mettant en avant la nécessité de s'intéresser à la reconception du travail en équipe HT [132, 191, 195, 196]. Nous pensons que ce point de vue plus situé sur le travail à faire est une voie prometteuse pour classifier ce continuum d'interaction.

2.3.4 Conception de la collaboration humain-technologie

Concevoir des situations de travail qui permettent et exploitent les synergies HT nécessite un renouvellement méthodologique étant donné les insuffisances ontologiques des approches technocentrées et anthropocentrées pour aborder l'espace-problème de la collaboration HT [183, 197]. Plusieurs cadres conceptuels ont été proposés dans la littérature pour capturer les piliers qui composent la collaboration HT. Seeber et coll. [48] distinguent trois piliers à considérer pour concevoir des systèmes à initiative mixte HT : le dispositif technologique, l'institution (design organisationnel) et la collaboration HT. Dans cette dernière, trois sous-piliers sont identifiés :

1. Conception de l'équipe humain-technologie (*team design*) : comprends la définition des rôles, le nombre d'humains et d'agent logiciel, et des critères spatio-temporels
2. Conception des tâches (*task design*) : division du travail et allocation fonctionnelle à l'humain, la technologie ou aux deux entités dépendamment de leurs capacités et limites
3. Conception des pratiques de travail (*work practice design*) : configuration des aspects collaboratifs incluant la coordination, la communication, l'évaluation ou le partage de connaissance

Ce cadre conceptuel complète bien la pyramide AUTOS proposée par Boy [152] en spécifiant plus en détail les aspects de coordination et de coopération. Dans la même lignée, *Xiong et coll.* [78] définissent trois perspectives à prendre en compte pour concevoir la collaboration

HT : organisationnelle, relationnelle et interactionnelle. La partie organisationnelle concerne la configuration de l'équipe HT, la division des tâches et des rôles. La perspective relationnelle s'intéresse aux aspects de confiance, d'acceptation et d'interdépendance. La perspective interactionnelle représente l'interface entre les deux entités pour favoriser communication, actions unilatérales et compréhension mutuelle. Parmi les autres cadres conceptuels (p. ex. taxonomies) notables que l'on retrouve dans la littérature, *Dubey et coll.* [50], *Dellerman et coll.* [198] ou encore *Van Diggelen et coll.* [113] identifient plusieurs autres construits qui facilitent une bonne collaboration HT.

Pour englober ces différents prérequis conceptuels, Johnson et coll. [63, 66, 67] proposent la méthode de *conception co-active* qui repose sur la théorie de l'activité conjointe pour concevoir des équipes de travail HT. Alors que dans les tables d'automatisation, le rôle de l'humain est défini selon les actions et capacités du dispositif technologique, la conception co-active repose sur le principe fondamental d'interdépendance humain-machine pour façonner la DA. Ce principe d'interdépendance reconnaît la relation entre capacité et dépendance : *les interdépendances [...] résultent du fait qu'une entité a besoin du soutien d'une autre entité pour accomplir sa tâche ou remplir sa responsabilité* [199, p.7]. Ainsi la *capacité renvoie aux connaissances, aptitudes, habiletés et ressources dont dispose une entité, humaine ou artificielle, pour accomplir de manière autonome une tâche* [66]. La *dépendance existe quand une entité ne possède pas les capacités requises pour complètement exercer une tâche de manière autonome dans un contexte donné* [66, p.6]. Étant donné qu'un système automatisé ne remplace jamais un emploi, mais automatise une partie des tâches qu'il faut réorganiser dans un tout homogène, cette notion d'interdépendance vise à gérer les relations de dépendances lorsqu'une entité humaine ou artificielle réalise une tâche et que l'autre entité l'assiste dans cet accomplissement. Cette méthode s'éloigne du mythe de substitution en définissant (i) les capacités requises pour accomplir une tâche ; (ii) les besoins d'interdépendance pour jongler entre l'accomplissement d'une tâche humaine, artificielle ou hybride ; et (iii) évaluer différents scénarios opérationnels possibles pour accomplir une tâche en ayant l'humain assisté par la technologie, ou la technologie assistée par l'humain. On cherche ici à configurer l'équipe HT pour des conditions nominales et non nominales, et ainsi tenter de couvrir le plus de variabilité opérationnelle identifiée avant l'implantation technologique. Ces besoins d'interdépendances sont exprimés par des exigences entre termes "d'observabilité", de "prévisibilité" et de "dirétabilité" (Voir 2.3.3) que l'analyse d'interdépendance, l'outil principal de la méthode de *conception co-active*, modélise et capture.

Cette méthode semble la plus adaptée pour concevoir des situations de travail HT en tenant compte du travail à réaliser, des tâches distribuées aux deux entités, et leur relation d'interdépendance. Cependant, il n'est pas clair comment une analyse de l'existant, comme

proposée par *Roth et al.* [133] peut s'intégrer dans l'outil d'analyse d'interdépendance. Des améliorations artefactuelles [200] devraient étendre les caractéristiques de l'analyse d'interdépendance pour y intégrer les connaissances opérationnelles capturées dans l'analyse du système existant. Ceci permettrait notamment de tenir compte des contraintes du domaine (demande opérationnelle, exigences du travail) dans la configuration des équipes HT pour s'assurer de la validité écologique des solutions proposées.

Limites méthodologiques et théoriques

En guise de conclusion intermédiaire, on relève de la littérature des limites méthodologiques et théoriques pour concevoir des situations de travail qui permettent et exploitent les synergies HT dans des contextes opérationnels. Les principes généraux de conception pour favoriser une DA centrés sur l'humain et son activité de travail sont trop génériques et approximatifs pour guider les concepteurs de technologies 4.0 dans leur pratique quotidienne [201]. En effet, la littérature qui s'inscrit dans l'ère de la 4RI regorge de principes, plans d'action et cadres conceptuels qui documentent le "savoir quoi" mais peu le "savoir comment" [201]. Les orientations fournies aux concepteurs se limitent bien souvent à des injonctions prescriptives qui ne soutiennent pas convenablement les différents cycles de conception de projets de DA. Il n'existe que peu de connaissances actionnables sur la manière de concevoir des situations de travail HT ou pour accompagner les mutations sociales et opérationnelles qui entourent les projets de DA [68]. On pourrait ainsi se demander si l'opérationnalisation des concepts sociotechniques ne devrait pas passer par l'étude située des espaces de conception, et ainsi déterminer comment il est possible d'intégrer des données et principes sur (i) les situations de travail du système existant et (ii) la collaboration HT dans le cycle de vie de projets de DA. En effet, ces cadres prescriptifs et descendants ne permettent pas d'apprécier, analyser et relever les logiques opératoires complexes que l'on retrouve dans des situations de travail. Les concepteurs de systèmes complexes ont en effet besoin de tenir compte des logiques opératoires du système existant afin de comprendre ce qui est automatisé et automatisable (notion de capacité), ainsi que d'un accompagnement plus détaillé sur les éléments de conception qui touchent à la collaboration HT [62, 162]. Les méthodes actuelles, même les plus avancées (c'est à dire, *co active design* [66]) fournissent un support limité sur ces deux aspects.

Nous ajouterons que les études portant sur une conception anthropocentrée des DA dans la 4RI sont souvent conduites dans des environnements contrôlés de laboratoire, ce qui soulève une limitation majeure. Ces études se concentrent souvent sur l'étude d'un aspect ou un concept générique qui favorise une bonne collaboration HT, par exemple la confiance en la technologie ou la distribution des tâches. Bien que primordial, cette vision descendante de

prescription normative doit être complétée avec une perspective ascendante qui documente les éléments contextuels qui pourrait influencer le processus de DA, dont la collaboration HT fait partie [202]. Cette phase ascendante vise à générer des connaissances opérationnelles (travail à réaliser, contraintes du domaine, exigences opérationnelles) qui ultimement orientent et valident la pertinence des décisions de conception prises [133]. *Pritchett et coll.* [203] et *Ma et coll.* [169] soulignent les limites des approches de conception qui ne tiennent pas compte des facteurs contextuels et des logiques opérationnelles ("écologie du travail") pour la conception de la collaboration HT. Les futures méthodes de conception devraient être motivées par l'adoption d'une vision systémique qui considère l'humain en interaction dans son système de travail [204], et intégrant la nouvelle technologie 4.0, plutôt que seulement les aspects de collaboration humain-technologie 4.0. Ce cadre d'analyse permettrait d'anticiper les effets du déploiement technologie sur les autres aspects du système de travail qui comprend non exhaustivement : l'impact de la technologie sur les postes en amont et en aval, l'interdépendance entre acteurs et opérateurs, sur le collectif de travail ou la reconception des structures et processus organisationnels [27].

De plus, *Kadir et coll.* [31] et *Rauch et coll.* [77] soulignent la rareté de études empiriques portant sur l'intégration des facteurs humains dans la 4RI. Il existe peu d'études ayant confronté modèles conceptuels et principes de conception sociotechniques dans des cas d'études réels. La confrontation empirique de ces modèles permettrait d'évaluer le support qu'ils fournissent tout au long du cycle de vie de projets de DA : est-ce qu'ils permettent de configurer, de manière incrémentale, les caractéristiques du futur système de travail [27] ou seulement des aspects superficiels de l'interaction HT? Cet élément est très bien illustré dans une étude portant sur la digitalisation du contrôle de trafic aérien [205]. Les auteurs soulignent les avantages d'adopter un grain d'analyse fin, centré sur le travail futur, pour faire ressortir les *qualités transcendantes du futur système de travail plutôt que se focaliser uniquement sur les caractéristiques superficielles de l'interface* [205, p.7]. Cet argument est corroboré par d'autres études [65, 132] qui montrent l'importance de partir des situations de travail existantes pour façonner les fonctionnalités et spécificités des technologies 4.0. Cette direction est celle que nous adopterons tout au long de cette thèse. La prochaine section vise à recenser brièvement les méthodes et cadres conceptuels pour analyser le travail humain en milieu naturel en vue d'informer la conception de dispositif technologique.

2.4 Analyse du travail pour informer la conception

Cette section recense en premier lieu les différents cadres d'analyse qui nous semble pertinent pour étudier le travail humain en contexte réel. En deuxième lieu, nous présentons les

méthodes et moyens existants pour représenter les données recueillies sur le travail humain en vue de soutenir les processus de conception de dispositifs technologiques.

2.4.1 Cadres d'analyse du travail humain

Ergonomie centrée sur l'activité

L'ergonomie s'est traditionnellement développée selon deux courants : l'ergonomie des "facteurs humains" et l'ergonomie de "l'activité" (ou ergonomie des "situations de travail" [206]). Le courant des facteurs humains cherche à étudier et comprendre les capacités et les limites du fonctionnement humain pour pouvoir les intégrer dans la *conception des tâches, des emplois, des produits, des organisations, des environnements et des systèmes en vue de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limites des personnes*¹. Si visée est plutôt normative puisqu'elle a pour objectif de généraliser des connaissances sur les caractéristiques humaines (physiques et cognitives) [207]. Le courant de l'ergonomie de l'activité a une portée plus inductive : elle *mobilise et produit des connaissances* [localisées] *sur l'activité de la personne au travail en vue d'améliorer les situations de travail* [16, p30.], tant en terme de santé que de performance [202]. Pour simplifier, l'ergonomie des facteurs humains s'intéresse aux capacités et limites du fonctionnement humain, tandis que l'ergonomie de l'activité, s'intéresse à la personne en activité dans un contexte donné et dans une perspective systémique. Malgré tout, certains chercheurs s'accordent à dire que ces deux courants sont complémentaires et s'inscrivent dans une forme de temporalité propre aux interventions et recherches en ergonomie [58, 206]. Même si la frontière entre ces deux courants tend à s'affaïsser via l'émergence de discipline convergente - comme l'ingénierie de la résilience [208] - nous posons ici les bases théoriques (et historiques) dans lesquelles s'inscrit cette thèse. Les paragraphes suivants visent à souligner nos emprunts conceptuels et méthodologiques propre à l'ergonomie de l'activité.

L'ergonomie de l'activité repose sur une distinction fondatrice entre le travail prescrit et l'activité de travail :

- Le travail prescrit est constitué par un ensemble d'objectifs pré-déterminés, assignés aux opérateurs par les concepteurs et organisateurs du travail en vue d'atteindre des résultats anticipés [58, 209]. Ces prescriptions *précisent un ensemble de conditions à réunir et de phases à respecter pour élaborer un objet, une pièce ou un service* [58, p.33]. Elles peuvent se retrouver dans les fiches des postes, les nomenclatures, les procédures standards etc.

1. <https://iea.cc/what-is-ergonomics/>

- L'*activité de travail* est l'ensemble des actes physiques, mentaux et sociaux que réalise un être humain en vue d'atteindre les objectifs fixés par la tâche [210, 211], autrement dit, tout ce que l'individu met réellement en oeuvre pour répondre aux consignes et exigences du travail dans un contexte donné [211]. L'activité d'une personne comporte ainsi des composantes physiques, cognitives et socio-affectives [16]. Seulement une infime partie de cette activité est visible pour l'observateur extérieur (gestes, postures, communication), ce qui génère des enjeux méthodologiques importants pour "accéder" au non visible (perceptions, raisonnements, connaissances, valeurs, émotions) [211].

L'activité de travail est la *réponse* située d'une personne aux exigences et aux conditions de réalisation du travail, incluant son expérience et les caractéristiques de son propre état ; fatigue, stress, etc. [16, 58, 211, 212]. Cette réponse est sous l'influence de nombreux facteurs contextuels, appelés déterminants, qui façonnent et contraignent la manière dont le travail est réalisé / peut se réaliser [16]. On dénote trois grandes familles de déterminants : (1) les tâches et les exigences, (2) *les conditions et moyens offerts par le milieu* (organisation du travail, environnement physique et technologies) et l'environnement social (structures sociales) [16]. Ces déterminants sont souvent amenés à varier dans le temps : état du processus, de la machine, du matériel ou de la matière première ; disponibilité des ressources, de l'équipe ou des collègues de travail ; contraintes de temps [211]. La personne en activité cherche ainsi à atteindre les objectifs qui lui sont fixés en tenant compte de l'état actuel de la situation, incluant les variations du contexte qui surgissent et qui n'ont pas été formalisées dans des cahiers de procédures [16, 211]. Par exemple, la précision, la clarté et la complétude des consignes fournies peuvent avoir une influence sur l'interprétation et la variance dans des résultats entre différents employés [16].

Pour combler ces lacunes normatives, l'individu en situation de travail passe par un processus de régulation continu lui permettant de *faire face à la variabilité des exigences et des conditions de travail et face à sa propre variabilité* [16, p.37], et ce pour sélectionner le compromis le plus acceptable pour remplir les objectifs fixés tout en préservant sa santé [58, 213]. Ce compromis dépend des conditions de réalisation du travail et des circonstances (p. ex. ressources disponibles), mais aussi de l'expérience de l'individu [212–214]. Les problématiques de santé surviennent quand la marge de manoeuvre de l'individu diminue ; soit quand son autonomie, ses possibilités d'adaptation et les stratégies qu'il peut mettre en place sont considérablement réduites [16, 58, 211]. Ainsi, les conséquences de l'activité peuvent s'observer autant sur le plan individuel que organisationnel [16]. L'activité engendre des effets positifs (développement des habiletés et connaissances métiers, délais de production respectés) et/ou négatifs (problèmes qualité, troubles musculo-squelettiques). En effet, *la performance atteinte ne reflète pas le coût humain que sa réalisation a généré : des résultats excellents (du point de vue des critères*

de l'entreprise) ont pu être atteints à un coût élevé pour certains opérateurs [211, p.29]. De plus, par l'activité, les personnes peuvent agir et transformer le cadre de travail (cf flèches grises ascendantes Figure 2.8). Par exemple, l'usage effectif d'une nouvelle technologie pourrait différer de ce qu'avaient anticipé les concepteurs puisque le nouvel usage répond mieux au contexte de réalisation du travail. Les conséquences de l'activité sur l'individu ou sur l'entreprise peuvent aussi entraîner des transformations du cadre de travail par les personnes, et ce selon la marge de manoeuvre dont elles disposent pour le faire. Par exemple, un individu pourrait demander à des collègues de travail de vérifier si la pièce qu'il vient d'usiner est conforme, et cette vérification inter-pairs pourrait être intégrée systématiquement par le collectif de travail.

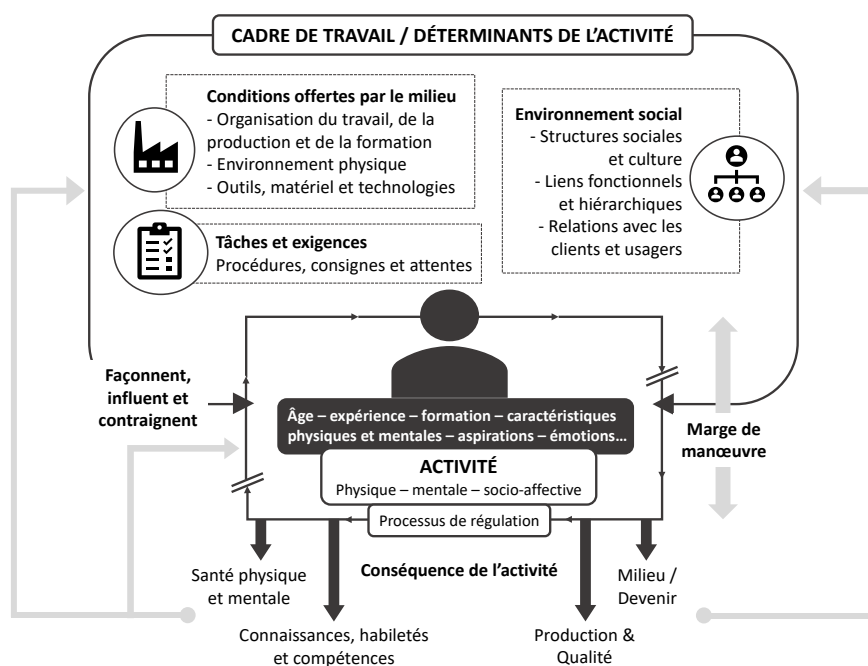


FIGURE 2.8 Modèle de la situation de travail centré sur la personne en activité. Tiré et adapté de *St-Vincent et coll.* [16] et *Vézina et coll.* [17].

Le modèle d'analyse des situations de travail centré sur la personne en activité de *Vézina et coll.* [17] (Figure 2.8) intègre les fondements conceptuels détaillés plus haut. Nous reconnaissons l'existence d'autres modèles pour effectuer une Analyse Ergonomique du Travail (AET) (p. ex. schéma des cinq carrés [210]) mais retenons le modèle de [17] pour réaliser une AET dans cette thèse. En somme, l'AET vise à comprendre les relations entre déterminants, activité de travail et conséquences de cette activité sur l'individu (santé et compétences) et le milieu de travail (production, qualité, "patrimoine de connaissances" [215] et devenir du milieu de travail) [16, 58]. Cette mise en relation du "comment" au "pourquoi" a comme

objectif final d'identifier des pistes de transformation en agissant sur les déterminants en question [16]. Dans le contexte de la 4RI, l'analyse des situations de travail centré sur la personne en activité peut servir à relever les connaissances tacites et savoir-faire d'opérateurs entraînés pour soutenir des processus de DA [16, 216]. Elle peut servir de base pour construire un cadre de projection qui matérialise une situation future, et déterminer la manière dont l'ajout ou la suppression d'un déterminant (implantation d'une solution digitale par exemple) transformerait l'activité de travail d'une personne [1, 68]. C'est d'ailleurs dans cette perspective que nous mobiliserons cette forme d'AET dans cette thèse.

Macro cognition

La *microcognition* renvoie à l'étude en laboratoire des éléments constitutifs des fonctions cognitives telles que la mémoire de travail et les processus attentionnels [217, 218]. Pour compléter cette vision, la *macrocognition* correspond à l'étude de la cognition humaine, notamment les fonctions et processus cognitifs de hauts niveaux, dans des milieux naturels comme les environnements de travail [217]. Les tenants de ce courant argumentent que l'étude de la cognition en laboratoire (et des modèles micro-cognitifs qui en découlent) ne permet pas d'aborder *les phénomènes cognitifs des interactions dynamiques entre les personnes, le travail et l'environnement dans lequel le travail se déroule* [144, p.1]. Dans une certaine mesure, ces mécanismes macrocognitifs émergent de l'interaction entre l'individu et les différents éléments de son système de travail, et sont donc difficilement reproductibles en laboratoire [144]. Ainsi, les modèles qui émergent des études de la cognition humaine en laboratoire sont labellisés comme *microcognitif*, et les modèles qui émergent de l'étude de la cognition humaine environnements réels de *macrocognitif* [219]. L'absence de perspective systémique et les distorsions qui émanent de l'étude des processus cognitifs en silo - soit sans comprendre le contexte dans lequel ils surviennent - sont mis en avant comme limite majeure des modèles microcognitifs [144, 218, 219]. Klein et coll. [218] ont proposé le terme macrocognition pour désigner les fonctions et processus cognitifs complexes qui émergent en milieu naturel. Les fonctions macrocognitives incluent la prise de décision, la (re)planification, la résolution de problème, le développement de l'expertise et la "construction de sens" (*sensemaking*) [144, 217]. Ces fonctions macrocognitives soutiennent des processus de hauts niveaux comme la gestion de l'attention, de l'incertitude, de situations inattendues et des risques présents, et la construction d'un référentiel commun (*common ground*) [217]. Ce courant de pensée se veut complémentaire à l'étude de la cognition en laboratoire malgré leur opposition tant en termes de modèles conceptuels que de moyens, méthodes, participants sollicités et finalités [4]. Le Tableau 2.4 souligne les divergences de ces deux courants d'études (se référer à [4] pour un portrait plus complet des divergences entre ces deux paradigmes). En effet, les tenants de

ce courant soutiennent que les recherches expérimentales sur la cognition en environnement contrôlé, dites « de laboratoire », produisent des modèles incomplets et déformés des fonctions et processus cognitifs d'experts en situation naturelle [144].

TABLEAU 2.4 Différences entre les études de la cognition humaine en laboratoire et en milieu naturel. Tiré de *Markman* [4]

Études en laboratoire (normatif)	Études en contexte naturel (descriptif)
Axées sur la répétabilité	Axées sur l'accumulation de nombreuses données descriptive
Sujets novices et nombreux	Sujets experts et restreints
Ignorent le contexte	Intègrent le contexte
Axées sur les mesures comportementales	Axées sur les mesures auto-déclarées et observées
Environnements simples	Environnements complexes
Haute validité interne	Haute validité écologique
Supportent les théories qui s'intéressent aux composantes de la prise de décision	Supportent les théories intégratives

L'étude de la cognition humaine en milieu naturel à une vocation plutôt descriptive [4]. Le travail humain, dans sa dimension cognitive, est marqué par la combinaison de fonctions (*construction de sens*) et processus (maintien d'un référentiel opérationnel commun) cognitifs de hauts niveaux, essentiel pour l'atteinte des objectifs de travail dans des environnements dynamiques [220]. Les études macrocognitives visent à comprendre et décrire les mécanismes adaptatifs, collaboratifs, distribués et situés de la cognition humaine lorsque soumis aux caractéristiques complexes des environnements de travail contemporain [144, 221]. Le Tableau 2.5 résume les caractéristiques que l'on retrouve dans des configurations de travail réel. Étant donné que ces caractéristiques se retrouvent quasi systématiquement dans les situations de travail, une lentille d'analyse macrocognitive devrait être utilisée pour comprendre les relations existantes entre plusieurs composantes du système de travail [222].

Les recherches menées sur le terrain sous le spectre de la macrocognition ont apporté au moins trois avancées majeures sur la cognition humaine. Premièrement, dans des configurations réelles de travail, lorsque des opérateurs réalisent des tâches d'analyse, de résolution de problèmes ou de diagnostic, ils réalisent une succession de décision qui influencent la suivante jusqu'à la résolution du problème ou l'identification de sa source (diagnostic) [223]. On parle alors de prise de décision dynamique : les processus décisionnels ne suivent pas une logique séquentielle d'entrée-sortie, mais plutôt des boucles adaptatives de perception-cognition-action (ou "cycles de comportement" [144]) en réponse aux contraintes situationnelles et au caractère dynamique des systèmes de travail contemporains [18, 144, 217, 222]. Cela peut impliquer d'envisager des compromis ou de sélectionner des cours d'action dif-

TABLEAU 2.5 Caractéristiques des situations où le cadre de la macrocognition est important pour l'inspection industrielle (adapté de Lee et coll. [5])

Caractéristiques	Exemples
Problèmes mal définis avec objectifs ambigus	Les explications présentes sur un cahier de procédures sont ambiguës et laissent leur lot d'interprétation aux opérateurs qui les appliquent
Environnement dynamique et incertain	Un défaut trouvé sur une pièce en production amène un changement de traitement, de nouvelles mesures et considérations à prendre
Environnements riches en information	On retrouve de l'information sur un tableau de bord, différentes fenêtres d'un progiciel de gestion intégrée, des cahiers de procédures, etc.
Boucles itératives de perception-action	Toute décision concernant un défaut va entraîner un certain type de réparation, qui va à son tour, entraîner de nouvelles opérations à réaliser et des choix à faire
Pression temporelle	Le traitement d'une pièce doit respecter un certain délai en suivant des temps standards
Situation à risque	Une mauvaise décision sur une pièce de moteur d'avion peut engendrer des dysfonctionnements futurs
Synchronisation opératoire avec plusieurs corps de métiers	De nombreuses personnes apportent des informations, actions et des points de vue qui influencent un même processus décisionnel

férents dans le plan en cours [224]. Cette notion de facteurs situationnels, représentée à la Figure 2.9, s'apparente d'ailleurs très fortement à la notion de "déterminant de l'activité" en ergonomie de l'activité. Deuxièmement, les acteurs n'agissent pas de manière isolée dans les systèmes de travail [144, 193, 223]. Le suffixe "macro-" souligne le fait que la cognition n'est pas un construit qui se retrouve seulement dans l'esprit humain, mais s'étend aussi dans son environnement à travers d'autres acteurs et artefacts technologiques [144, 221]. Par exemple, les technologies de l'information et de la communication deviennent des ressources pour l'action en stockant les critères qualité sur lesquels repose un opérateur, ce qui a pour conséquence d'alléger sa mémoire de travail. De plus, *Patterson et coll.* [223] ont montré comment les membres d'équipage de la navette spatiale Atlantis (16ème mission) s'engagent dans des tâches de double-vérification collaboratives afin d'assurer la sécurité des choix réalisés, mais aussi leur alignement vers le succès de la mission. Troisièmement, les recherches empiriques dans le domaine de la Macrocognition ont démontré que la *robustesse des décisions prises dépend de phénomènes macrocognitifs au niveau de la signification (meaning-level), des connaissances (knowledge-level) et du contexte* [220, p.5]. Dans ce contexte, plusieurs grains d'analyse sont recommandés pour capturer l'ensemble des caractéristiques qui composent l'espace décisionnel, ainsi que leurs interrelations : informations (in)disponibles et leurs mises en relations, connaissances tacites, interprétation des signaux de l'environnement, critères de réussites clairs ou mal définis, variables décisionnelles, contraintes de temps, règles

institutionnelles, protocoles ou procédures standards, heuristiques développées ou autres acteurs avec qui l'individu collabore [220,225,226]. Cette cognition multi-niveaux (signification, connaissance, contexte), propre à l'humain, est difficilement reproductible et intégrable dans les architectures computationnelles comme des algorithmes d'apprentissage machine [220]. Ainsi, le risque d'intégrer un système intelligent dans une situation de travail sans avoir capturé et modélisé la sémantique de l'espace de décision au préalable peut engendrer la génération de résultats incomplets, inappropriés, voire erronés [220,227]. Dans une perspective de DA, le chercheur doit rendre compte des processus cognitifs à l'oeuvre dans la réalisation des tâches et s'assurer de leurs adéquations avec les logiques opérationnelles et règles décisionnelles du domaine. Le défi réside dans la représentation "actionnable" de ces phénomènes macrocognitifs pour la conception de la technologie 4.0.

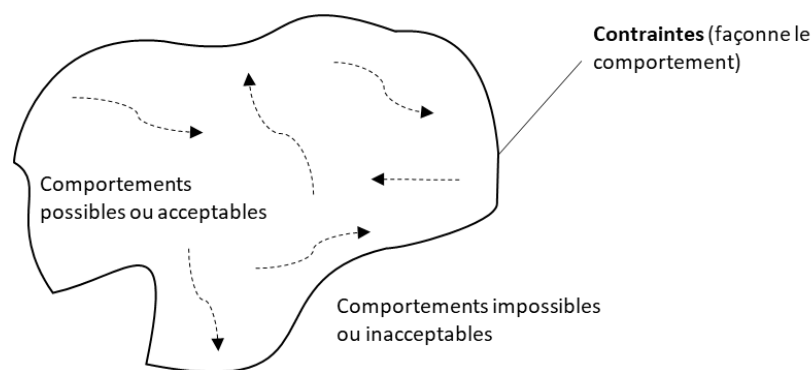


FIGURE 2.9 Les contraintes limitent le comportement humain mais façonnent aussi les potentiels d'actions possibles (affordances). Adapté de [18]

2.4.2 Convergences et limites des méthodes descriptives pour la conception

L'ergonomie de l'activité et la macrocognition reconnaissent ainsi la nécessité d'aller sur le terrain observer les experts en activité pour comprendre les dynamiques opérationnelles et l'influence des facteurs contextuels sur la réalisation du travail : « l'expertise réelle découle de l'expérience pratique dans le domaine plutôt que de la lecture de textes standard » [228, p.3]. Les analyses documentaires et descriptions des tâches (travail prescrit) peuvent fournir des repères à l'analyste qui s'initie à un nouveau domaine d'étude [228]. Cependant, c'est la confrontation au réel de l'activité qui permet d'élucider et acquérir les connaissances tacites et stratégies implicites sur lesquelles reposent les experts pour répondre à la demande opérationnelle et atteindre les résultats escomptés [21, 58, 228, 229]. En effet, l'objectif n'est pas uniquement de modéliser les décisions que prennent les experts *in situ*, mais surtout de *saisir et représenter les règles, contraintes et procédures* qui ont généré cette décision [225, p.2].

Ces relations entre phénomènes ne sont jamais totalement explicites dans des cahiers de procédures et nécessitent d'analyser l'activité de travail d'un expert en situation pour s'en saisir [230]. Les deux courants proposent ainsi d'approcher l'analyse des situations de travail en ayant deux perspectives qui se renforcent mutuellement : un accent sur le système de travail et les contraintes qui façonnent ou autorisent l'activité [210,231] et un accent sur la personne en activité, notamment ses connaissances, stratégies et compétences [210,231]. Enfin les deux courants proposent de trianguler les méthodes de collectes de données pour capturer l'essence de l'activité de travail d'un individu, permettre sa mise en mots et combler les limites de chaque méthode [231]. Les individus peuvent ne pas être capable d'expliquer en détail toutes les facettes de leur activité (surtout leurs automatismes), notamment par l'intermédiaire d'entrevues seulement [16,220]. Cependant, avec un accompagnement approprié permettant la mise en mot articulé de leur activité, *les gens peuvent vous dire comment ils comprennent un événement ou un système, ils peuvent décrire leur connaissance de celui-ci, ainsi que les concepts et les principes qui sont impliqués* [220, p.9]. Cet accompagnement est assuré par la présentation de matériel sur leur activité (notes écrites, captures audio et vidéos), comme orchestré dans les entrevues d'auto-confrontation en ergonomie de l'activité [16,232] ou les méthodes rétrospectives guidées par les tâches dans le courant de la macrocognition [220]. Ces différentes méthodes peuvent se regrouper selon trois grandes catégories : l'observation, l'entretien et le focus group, et les méthodes génératives (tri de cartes, magicien d'Oz etc.) [231]. Le lecteur peut se référer à une description et catégorisation plus nuancée de ces méthodes de collecte de données dans l'article de *Hoffman et coll.* [220, p.11] ou le chapitre de livre sur le sujet de *Shadbolt et coll.* [228].

Les convergences méthodologiques et conceptuelles de ces deux disciplines souffrent aussi des mêmes limites. Une des critiques adressées aux résultats descriptifs que génèrent les études du travail humain en situation concerne leur difficulté à passer d'une phase d'analyse à une phase de design [233]. En effet, l'approche descriptive des études menées se heurte à des problématiques d'actionnabilité quand vient le temps de concevoir plutôt que "d'informer la conception" [233–236]. Cette lacune est définie par *Robert Hoffman* comme suit :

Such guidance is certainly valuable and useful. Guidance cautions us about the complexities of task allocation and the ironies of automation. Thus, guidance informs the design process. It could be taken as policy for design or a criterion for design success. But such principles can have only an indirect and limited influence on software design itself. In presentations about cognitive systems engineering projects at professional meetings, we often hear that one or another method of CTA was employed to inform design. But what software developers

need is designs. That's the gap [235, p.1].

La manière dont sont représentées les résultats des analyses du travail s'intègre mal dans les méthodes, outils et construits propres aux cycles d'ingénierie des technologies 4.0. L'AET permet de dresser des hypothèses entre le "pourquoi" et le "comment" de l'activité de travail d'une personne par la triade déterminant(s), activité et effets [58]. Du côté de la *Macro-cognition* et des courants adjacents comme *l'ingénierie cognitive*, *l'analyse cognitive des tâches* [237] et *l'analyse cognitive du travail* [59] proposent quelques modèles descriptifs permettant de capturer l'activité cognitive d'expert et de représenter visuellement ces résultats de terrain [238, 239]. Par exemple, dans un objectif d'automatisation, *Everitt et coll.* [240] ont utilisé l'analyse hiérarchique de tâches (AHT) [241] combiné avec le modèle *Skill, Rules and Knowledge* [242] afin de capturer et codifier les connaissances utilisées ainsi que les compétences requises sur des tâches de polissage industriel. Plus récemment, *Johnson et coll.* [6] ont aussi utilisé l'AHT combiné avec une décomposition de tâches [243] afin d'analyser la dimension cognitive de l'activité d'inspection. La décomposition des tâches permet de codifier les éléments d'une tâche selon plusieurs catégories : stimuli, décisions à prendre, erreurs possibles et niveau d'expertise requis. Le Tableau 2.6 montre un exemple de décomposition de tâches via l'AHT sur des tâches d'inspection qualité [6].

TABLEAU 2.6 Décomposition d'une tâche d'inspection. Adpté de [6]

#	Tâches et sous-tâches	Stimuli(s)	Décision	Niveau d'expertise
0	Inspecter et diagnostiquer l'état des composants			
5.2	Inspecter chaque composant individuellement	<i>Visuel</i> : anomalie, telle qu'un changement de couleur ou une déformation de surface <i>Tactile</i> : présence d'une élévation de surface	"Ai-je oublié d'inspecter une zone de la pièce?"	Skill- and rule-based
5.3	Relever tous les défauts	<i>Visuel</i> : relever les anomalies détectées	"Cette anomalie nécessite-t-elle un examen plus approfondi?"	Skill- and rule-based
5.4	Évaluer l'anomalie	<i>Visuel</i> : utiliser la documentation et les procédures standards pertinentes	"Ai-je correctement mesuré cette anomalie?"	Rule-based

Ces modèles décrivent en profondeur les situations de travail actuelles, mais disposent d'une influence très limitée pour façonner les caractéristiques du produit final, de la collaboration HT ou des futures situations de travail. Présentés comme tels, les modèles descriptifs du travail sont soumis à l'interprétation des concepteurs de systèmes automatisés qui n'ont pas

forcément les bases théoriques et le guidage nécessaire pour se les approprier et les utiliser dans leurs lots de travail [63,239]. Pour être utiles en conception, ils doivent être suppléés par des opérations de transformation et d'adaptation, et comprennent ainsi d'autres enjeux de représentativité, de validité, mais aussi de collaboration entre acteurs de la conception [13,70,233,244]. Qui plus est, plusieurs auteurs soulignent l'absence d'approche uniformisée facilitant la transposition systématique des analyses descriptives du travail humain à la conception et l'implantation de systèmes automatisés [11,164,233,234,244]. Une plus grande collaboration entre spécialistes en facteurs humains et concepteurs de technologies 4.0 dans les activités de conception est attendue pour combler ce fossé, ce qui fera l'objet de la prochaine section.

2.5 Travail collectif de conception

La collaboration demeure au centre des processus de conception contemporains [55]. Alors qu'un grand nombre d'ouvrages soulignent les avantages de la collaboration multidisciplinaire, celle-ci est également associée à des défis concernant l'intégration d'une diversité de points de vue [19,55]. Dans une récente revue systématique de la littérature, Nguyen et coll. [55] identifient les cinq piliers de la conception collaborative : (1) la communication, (2) les connaissances et la diversité disciplinaire, (3) la confiance entre acteurs, (4) les barrières et les facilitateurs de la communication, et (5) le langage et les rôles de chacun. Les équipes de conception multidisciplinaires sont exposées à ces piliers quotidiennement compte tenu de la complexité des projets technologiques contemporains [244]. Les dimensions sociales, économiques, techniques, organisationnelles et éthiques qui émanent de ces projets nécessitent une plus grande collaboration entre disciplines qui n'ont pas forcément l'habitude de collaborer et dialoguer ensemble [239,244]. Le cas de l'intelligence artificielle reflète bien ce besoin. Les exemples de conséquences négatives (biais algorithmiques ou écart de diagnostic IA-radiologue sur les patients atteint d'un cancer [37]) ont engendré une prise de conscience collective sur la nécessité d'intégrer plusieurs *background disciplinaire* dans les groupes de conception pour adresser simultanément les sphères évoquées plus haut en conception [146]. Cependant, l'organisation du travail collectif et la matérialisation des différents points de vue dans le produit final ne vont pas de soi [245]. En restant ancrées dans le contexte de cette thèse, de nombreuses recherches antérieures ont rapporté la difficulté qu'éprouvent les ergonomes à intégrer leurs données et leurs concepts dans les contenus de conception [19,57,63,165,233,234,236,246]. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, (1) le format de transmission de résultats des analyses (descriptives) ergonomique s'intègre mal dans les structures de programmation et ne conduit pas, en soi, à des solutions de conception [57,233,247] ; et (2) les concepteurs manquent d'orientation pour utiliser

ces éléments en intrants actionnables dans leurs lots de travail [60]. Pour palier à cet écart entre analyse et design, Wilson et Houghthon [247] proposent d'étudier les méthodes, délais et objectifs poursuivis par les concepteurs du projet. Cette compréhension faciliterait la collaboration et l'échange d'information interdisciplinaire. Dans la même lignée, Philip J. Smith [248] estime qu'il est de la responsabilité des spécialistes en facteurs humains & ergonomie de développer une compréhension approfondie des méthodes et moyens pour concrètement influencer la conception et les concepteurs, et d'évaluer leur efficacité. Autrement dit, il est du ressort des ergonomes de comprendre comment les concepteurs travaillent pour déterminer les modalités qui permettent et supportent une collaboration efficace. Enfin, *Hyysalo et coll.* [245] relèvent plusieurs facteurs qui entravent la collaboration interfonctionnelle dans des projets de conception logicielle : le manque de guidage et de prise en compte des aspects collaboratifs, de gestion des connaissances, de support cognitif dans la conception d'algorithmes dans des collectifs de travail. Ils estiment qu'il est nécessaire de développer de nouveaux mécanismes de support cognitif qui intègrent une grande hétérogénéité d'informations et permettent l'assemblage de connaissance interfonctionnelle tout au long du processus de conception. Les sous-sections suivantes vont aborder les mécanismes cognitifs de la conception et les moyens qui existent pour soutenir la production collective d'un dispositif technologique.

2.5.1 Dimension socio-cognitive de la conception

La conception peut se définir comme la spécification d'un artefact ² en termes de fonctions à remplir, de besoins à assouvir, de buts à atteindre et conditions à respecter [250, 251]. La dimension cognitive de la conception concerne ainsi les fonctions et processus (macro-)cognitifs qui se produisent lors de la construction d'un artefact, ainsi que les connaissances mobilisées pour y parvenir [244]. Dans cette perspective cognitive, la conception est un processus de construction et résolution de problème simultanée [206, 252]. En partant de l'identification et la définition d'un problème à résoudre (*espace-problème*), la conception est suivie de phases itératives, plutôt opportunistes, visant à imaginer et produire des représentations sur un certain nombre d'options qui viennent bien souvent enrichir la formulation du problème initial [206, 252, 253]. Le choix de la solution retenue se fait en fonction de l'option qui satisfait le mieux les besoins de la situation (*espace-solution*) [254, 255]. Ainsi, ces deux espaces coévoluent ensemble dans un processus de conception jusqu'à l'atteinte d'un *fit* problème-solution satisfaisant [256]. Cette coévolution progressive de la construction de la représentation et de la résolution du problème passe par des mécanismes cognitifs (individuels) et socio-cognitifs

2. Nous définissons dans cette thèse les artefacts au sens de Herbert Simon soit n'importe quelle entité fabriqué par l'humain que ce soit un objet physique (tournevis, machine à commande numérique) ou symbolique (texte de loi, procédures) [249]

(collectifs).

Pour *Visser*, la notion de représentation est au coeur des processus de conception [250, 253]. Elle défend l'idée que la conception multidisciplinaire est une activité de construction de représentations interconcepteurs passant par trois phases : génération, transformation et évaluation [250, 251]. Dans une perspective collaborative, la construction des représentations renvoie à l'établissement d'un référentiel opératif commun (ROC) initial entre concepteurs sur l'espace-problème (aussi appelé *représentation de départ*). Ce ROC est amené à subir des opérations de transformations par l'ajout, l'approfondissement ou la modification de sa structure par les différentes actions conduites par les concepteurs afin de tendre vers un état final désirable (aussi appelé *représentation d'arrivée*) [251]. La représentation d'arrivée est ensuite évaluée selon une ou plusieurs références pour voir si elle satisfait un ensemble de besoins et attentes identifiés préalablement [251].

La conception est aussi perçue comme un processus de gestion des connaissances où les concepteurs génèrent, mobilisent, organisent et partagent un certain nombre de ressources informationnelles pour aborder l'incertitude et la complexité des processus de conception [251, 257–259]. Plusieurs points de cette définition méritent une attention particulière. La mobilisation des connaissances consiste à (ré)utiliser les connaissances pertinentes provenant de *projets antérieurs et de les combiner avec des connaissances génériques, notamment au sujet des méthodes de conception, du domaine d'application ou des éléments techniques qui délimitent le projet* [251, p.9]. Dans le contexte de la programmation informatique, cette mobilisation suit largement une trajectoire descendante (de haut en bas), notamment dans les phases initiales ou conceptuelles du projet, mais peut être complétées par des *épisodes locaux opportunistes* (bas en haut) [260]. Ces épisodes locaux opportunistes comprennent des actions visant à capturer et intégrer des éléments contextuels (*context-specific*) de l'espace-problème dans le développement d'une solution [261], c'est-à-dire, besoins et caractéristiques des utilisateurs finaux, contraintes du domaine ou encore les aspects législatifs [262]. Ce mécanisme de capture de connaissances s'inscrit dans la phase de "génération" du cycle de gestion des connaissances en conception présenté plus haut. Ce recours aux épisodes locaux opportunistes s'est d'ailleurs démocratisé et accentué dans les équipes de conception par l'avènement des méthodes de conception anthropocentrées [263]. Cependant, force est de constater les études rapportant les difficultés rencontrées par les concepteurs pour intégrer et utiliser les connaissances sur le contexte d'utilisation dans les contenus de conception [262, 264, 265]. L'intégration d'une grande diversité d'acteurs, d'idées et de construits disciplinaires dans un produit peut se révéler d'une grande difficulté et même parfois devenir contre-productif [266]. La littérature regorge de méthodes et d'approches pour générer des connaissances contextuelles (voir Section 2.2). Cependant, il existe que très peu d'études qui évaluent comment

les concepteurs structurent et utilisent ces connaissances contextuelles dans le cadre de leur travail individuel et collectif dans des projets du monde réel. En l'absence d'une structure et d'objets qui supportent ces processus collaboratifs [245], le ROC sur le contexte d'utilisation peut s'avérer incomplet ou inutilisable pour soutenir une prise de décision collective [262]. Par manque d'orientations concrètes, les concepteurs se retrouvent ainsi à recourir à la solution la plus satisfaisante de leur point de vue, et non selon celui du futur contexte d'utilisation [261, 262]. Nous estimons qu'il existe un manque à combler concernant l'étude des méthodes et moyens qui soutiennent les équipes de conception dans la mise en relation des connaissances sur le contexte d'utilisation au produit en cours de développement, surtout dans le contexte de la 4RI.

Une piste largement étudiée en design pour faciliter la construction collective de représentations et l'échange de connaissances dans les processus de conception sont les objets médiateurs de conception [7, 266]. Nous développerons ce point dans la prochaine section, et nous le mettrons en perspective avec les concepts qui nous intéressent de la 4RI : façonner le développement de technologies 4.0 et la conception des futures situations de travail qui englobe la collaboration HT.

2.5.2 Soutenir le travail collaboratif de conception par les artefacts (objets) de conception et les simulations du travail

Donald A. Norman définit les artefacts comme un *instrument artificiel conçu pour conserver, rendre manifeste de l'information ou opérer sur elle, de façon à servir une fonction représentationnelle* [267, p.4]. Adapté à l'activité de conception, les artefacts sont des représentations intermédiaires malléables qui soutiennent le concepteur dans la matérialisation de son travail intellectuel, mais aussi et surtout, son partage et son remodelage avec les autres concepteurs dans une logique d'action collective [268]. Ces objets vont ainsi contribuer à façonner et outiller un espace de travail collaboratif entre concepteurs [268, 269]. *Broberg et coll.* distinguent plusieurs types d'objets de conception (Tableau 2.7).

Un élément intéressant qui ressort du Tableau 2.7 concerne la dernière colonne "Processus". *Broberg et coll.* [7] expliquent qu'il y a une distinction majeure à faire entre un prototype et l'action de prototyper. En effet, durant le prototypage, l'objet (le prototype) est animé et manipulé par plusieurs acteurs dans le cadre d'une conception collaborative, ce qui génère des apprentissages mutuels sur le produit et l'usage futur. Même chose pour les simulations du travail futur, comme pratiqué en ergonomie de conception, ces dernières sont généralement orchestrées autour d'objets (maquettes, prototypes) qui permettent l'action et la réflexion collective [136]. Cette distinction rend compte d'un aspect important des objets de

TABLEAU 2.7 Catégorisation des objets de conception utilisée en ergonomie. Adapté de [7].

Type d'objet	Exemples
Répertoires	Nomenclatures posturales
Formulaires et méthodes standardisées	Documents de types <i>blueprint</i> , questionnaires standardisés à remplir (SUS Usability Scale [270]) Méthodes et relevés pour des tests d'utilisabilité, des focus group ou des observations
Objets, modèles ou cartographies	Cartographie des processus, diagramme de tâches, <i>fishbone diagram</i> Maquettes et prototypes (basse et haute fidélité) Simulateur Dessins CAD Exigences fonctionnelles Personas
Échanges ou discours	Entrevues d'autoconfrontation Enregistrement vidéo d'une séquence de travail
Processus	Prototypage Simulation du travail future

conception : ils ne constituent pas une finalité en tant que telle, mais plutôt un moyen pour conceptualiser et tester des hypothèses de conception. L'animation autour de ces objets est aussi importante que les objets en tant que tels [73, 271]. Ils sont ainsi des représentations performatives : *on ne modélise pas une situation ou un système en soi, mais plutôt selon un objectif particulier* [272, p.1]. Ils fournissent :

- Un support à la génération, à la transformation et au partage de connaissances de conception (*design knowledge*) entre acteurs pour atteindre un état final désiré [273].
- Un moyen pour une multitude d'acteurs provenant d'horizons disciplinaires différents de communiquer, coordonner leurs actions et même coopérer sur une facette de la conception [274]. En ce sens les objets médiateurs *sont des catalyseurs des processus de conception participatifs* [7, p.1] puisqu'ils créent des passerelles facilitant l'alignement des intérêts [275].
- Une possibilité de matérialiser et tester des idées de conception dès le début du cycle de conception [276]
- Un moyen d'engagement mutuel dans la même perception de la situation par le partage d'un cadre commun (*shared frame*) [262, 277]

Ces objets peuvent remplir une fonction de représentation descriptive ou formative [73, 274, 278, 279]. Par exemple, il est possible de proposer une description des situations de travail à travers le modèle de la personne en activité [17] ou de réaliser une analyse hiérarchique des tâches [241]. La vocation formative des objets de conception visent à "opérer" sur cette

représentation pour façonner comment "elle pourrait être" (formative) dans le futur [73, 150, 267]. On retrouve généralement un équilibre entre le recours à des objets descriptifs et formatifs dans les processus de conception [73]. Les modèles descriptifs permettent de décrire l'existant, ce qui se relève d'une importance capitale pour tenir compte de l'écologie du domaine (ou de la validité écologique de la future situation développée).

Ces objets peuvent aussi être perçus comme des moyens pour briser le phénomène de fixation en conception [280]. Ce concept est défini comme *l'adhésion aveugle à un ensemble d'idées, de cadres de référence ou de concepts limitant la production d'un design conceptuel* [280, p.3], souvent basés sur des connaissances antérieures ou des solutions précédemment développées dans un contexte différent [281]. Nous mobilisons spécifiquement ce concept pour renverser une orientation de conception technocentrée vers une orientation "plus anthropocentrée". Plusieurs études ont montré que les concepteurs étaient capables de surmonter ces problèmes de fixation par la présentation d'un stimulus au bon moment [282, 283], comprenant une représentation alternative ou un enrichissement de l'espace-problème [283–285], l'anticipation d'un écueil ou d'une limitation dans la solution digitale favorisée [13], et surtout par le recours aux objets intermédiaires de conception [262, 286–289]. Ainsi, la présentation de fragments de situations de travail, par le biais d'artefacts de conception, pourrait être perçue comme un moyen de surmonter le phénomène de fixation et attirer l'attention des concepteurs sur la mise en relation des caractéristiques du domaine et la faisabilité technologique des solutions digitales. Comme indiqué par *Viswanathan et coll.* [290, p.1] *The psychological literature indicates that physical representations, by supporting designers' mental models of physical phenomena, might lead to more feasible designs.* Transposé à l'ergonomie de conception, la représentation des situations de travail dans des artefacts de conception pourrait supporter les concepteurs à concevoir des solutions digitales plus réalistes et proches des enjeux opérationnels. Cette mise en relation entre capacités technologiques et travail futur nous semble appropriée pour instrumenter une approche de conception "axée sur le travail" [13]. Cependant, il n'existe à notre connaissance aucun objet de conception permettant d'assurer cette mise en relation.

Bien que théorisée par plusieurs auteurs [291–296], nous remarquons que la capacité des objets médiateurs à intégrer les caractéristiques du domaine de travail [275] et les relier aux propriétés du futur produit et des futures situations de travail est peu abordée dans une perspective pratique dans la littérature [11, 13, 297, 298]. Dans l'exemple d'un programme informatique, comment s'assurer que les extrants d'un code respectent les contraintes législatives et les critères qualité mis en oeuvre dans les pratiques quotidiennes de travail? *Miller et Feigh* [13] postulent que les contraintes et caractéristiques qui régissent un système de travail existant seront aussi présentes dans le futur système de travail, mais moduleront peut-être

différemment le comportement humain. Il convient au chercheur d'établir un espace de transformation qui articule et transpose les propriétés du système existant de manière intelligible dans un système futur hypothétique incorporant les nouvelles capacités technologiques. Ce lien critique permet aux concepteurs de traverser le "golfe de conception" afin d'identifier et d'émuler la manière dont les choix de conception opèrent dans le système futur (Figure 2.10) [13]. *Miller et Feigh* [13] mettent en avant le recours à la spécification d'exigences fonctionnelles du domaine, comme pratiqué en ingénierie système, pour traverser le golfe de conception³ et établir des scénarios de simulation du travail futur et des expérimentations en laboratoire. Cette mise en relation entre activité future et caractéristiques du dispositif technologique est un point phare des méthodes de simulation pratiquées en ergonomie de conception [16, 19, 193, 194]. Ces méthodes de simulation visent en outre à enrichir *les projets de conception par la prise en compte du travail* [19, p.90]. Elles permettent d'approcher la conception des futures situations de travail dans *toutes ses dimensions (organisation, produits, outils, espaces, postes de travail, etc.)* [19, p.91] en mettant en perspective la solution proposée dans des environnements simulés réalistes [193, 299]. Elles sont organisées dans une démarche en trois étapes : (1) analyser le projet et les situations de travail existantes ; (2) simuler et concevoir le travail futur ; et (3) accompagner la conduite du changement (Figure 2.10) [19, 193]. Ces simulations s'appuient sur des supports tangibles (maquettes) pour simuler différents scénarios de l'activité future avec les acteurs concernés (concepteurs, gestionnaires, utilisateurs) [300]. Cet accompagnement par le travail supporte les équipes de conception dans l'évaluation de la faisabilité des transformations proposées et la validation d'un scénario d'activité privilégié qui spécifie le cadre futur de réalisation du travail [19, 117, 300].

Bien que cette idée nous apparaisse essentielle dans tout projet de transformation, elle n'est pas autosuffisante. Nous pensons que les caractéristiques (structures, états, propriétés, tâches, acteurs, règles, interactions entre éléments) qui relient et/ou changent entre le système actuel et le système futur peuvent être analysés plus en profondeur à travers divers objets de conception en complémentarité des simulations du travail. En effet, les simulations du travail font ressortir les barrières ou les facilitateurs à la conduite du travail futur en se focalisant sur l'activité émulée des personnes afin de construire les futures conditions de réalisation du travail [300]. Par cette focale sur l'humain en activité, elles n'ont qu'une capacité limitée à interroger et proposer des améliorations concernant les structures profondes, matérielles et logicielles, du dispositif technologique conçu. En effet, c'est l'apparition de problèmes d'usage (p. ex. phénomène d'activité empêchée [300] ou problème d'interaction) qui alerte

3. Écart qui existe entre le système actuel et le système futur. L'identification des exigences fonctionnelles du domaine établit un lien critique et une fondation entre les deux systèmes sur lequel les concepteurs peuvent se reposer pour enclencher un processus d'idéation (*envisioning process*) [13]

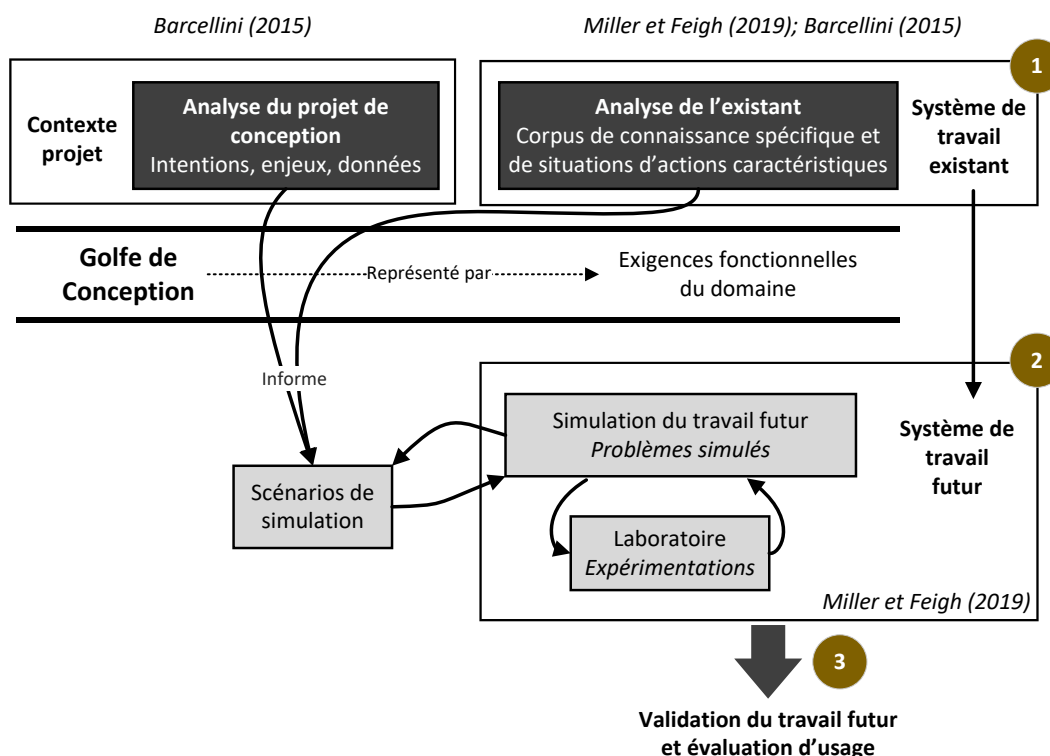


FIGURE 2.10 Golfe de conception et croisement conceptuel avec les méthodes de simulations en ergonomie. Adapté de [13] et [19].

l'analyste de la présence d'un dysfonctionnement. Ainsi, cela nécessite que les sessions de simulation puissent faire ressortir ces problématiques pour que l'ergonome valide le couplage usages-technologie. Les méthodes de conception actuelles en ergonomie doivent évoluer pour permettre de s'imprégner des spécificités du "monde digital"⁴ pour y exercer une influence sur sa (re)conception et donner des orientations concrètes aux concepteurs [13]. Concernant le travail HT, les prototypes, maquettes ou narrations (simulations discursives) actuelles peuvent s'avérer insuffisants pour aborder des phénomènes collaboratifs HT [301]. Une extension méthodologique et conceptuelle est nécessaire pour supporter la définition initiale des scénarios HT futurs sur laquelle les simulations pourraient être structurées, qu'elles prennent la forme de simulations discursives ou sur support tangible [19, 299, 301]. Au même titre que les entrevues d'auto-confrontation s'appuient sur des "traces d'observations" pour enrichir les échanges entre ergonome et travailleurs [16], les outils et objets de conception actuels doivent évoluer pour matérialiser et aborder en équipe interdisciplinaire l'espace-problème des technologies 4.0 et des nouvelles formes de collaboration HT. En termes de méthodes, l'équipe

4. La réalité ou le "monde digital" comprend l'ensemble des éléments qui composent l'environnement des expériences humaines quotidiennes et qui sont rendus possibles ou incorporés par les technologies digitales [20, p.5/6].

de conception pourrait maintenir et enrichir un répertoire de situations de collaboration à tester et à prioriser selon les points de friction identifiés (*design flaws* ou *edge cases*) ou les déficiences technologiques anticipées [13].

2.5.3 Du caractère "représentationnel" des artefacts de conception à leur médiation digitale

Recker et coll. [20] mettent en avant la fonction médiatrice des méthodes de modélisation conceptuelle (MC) dans leur habileté à capturer et transposer l'ontologie d'un domaine (structure profonde et liens entre les éléments) dans des technologies digitales. Longtemps connus pour leurs attributs représentationnels dans la modélisation des propriétés et des relations d'un domaine [302], les auteurs appuient l'idée que lors de processus de DA, la MC peut remplir une fonction médiatrice pour *faciliter la transition entre les réalités physiques⁵ et digitales* [20, p.2]. En ce sens, la médiation digitale renvoie aux tâches "liées à la facilitation de la représentation, la traduction, l'exécution et le changement entre aspects des réalités physiques et digitales" [20, p.7] :

- Représentation : les objets ou modèles de conception (appelés *scripts*) sont essentiels pour s'assurer que les structures profondes d'un domaine soient adéquatement intégrées dans les propriétés et fonctionnalités des objets digitaux⁶. Ils sont primordiaux pour s'assurer que la réalité physique est adéquatement représentée dans les objets digitaux. Par exemple, une des fonctions des MC serait de soutenir le développement d'objets digitaux tels que des programmes informatiques ou des algorithmes d'analytiques
- Exécution et traduction : les actions et décisions prises dans le monde digital influencent massivement les réalités du monde physique. En ce sens, les objets et "événements" digitaux *créent, façonnent et gouvernent les réalités du monde physique* [20, p.7]. Les objets de conception supportent ainsi la traduction de la sémantique du domaine (règles) dans un format exécutable dans des composantes logicielles. La réalité physique est traduite dans la réalité digitale. La traduction concerne aussi la capacité de certains agents logiciels à traduire un input en output, par exemple en passant d'un texte à une image dans le cas de la génération de visage humain factice [306]

5. La réalité ou le monde physique est *l'agrégation des éléments constitutifs et de leurs propriétés qui existent dans le monde réel*, [comprenant les entités tangibles, matérielles (voitures, batiments, technologies, personnes) et les constructions sociales (processus, organisation, relations) [20]] *tels qu'ils sont perçus par une personne ou un groupe* [303, A2]

6. Les objets digitaux sont des artefacts conçu par un être humain, comprenant des données et méga données, et qui sont au moins partiellement computable par des schèmes (comprendre ici *machine-readable files*) [304,305]. Ils peuvent prendre la forme de modules, programmes informatiques, lignes de code ou encore de systèmes de recommandation, de site web ou de voitures autonomes

- Changement : les objets ou modèles de conception *doivent désormais imprégner davantage d'aspects de l'infrastructure informatique, y compris les matériaux physiques, le code et les interfaces* [20, p.14] en plus de la structure profonde du domaine pour accompagner le changement entre réalités physiques et digitales. En ce sens, la MC assiste la représentation et le façonnage des caractéristiques du futur domaine. Par exemple, les objets digitaux présents dans les montres *FitBit* influencent massivement le comportement humain en proposant des actions correctives sur la base de données de santé et de patterns identifiés potentiellement néfastes [20].

Dans cette nouvelle vision, les objets ou modèles de conception représentent les propriétés structurelles et relationnelles des réalités physiques et digitales. Ainsi, *la signification des objets digitaux ne réside plus uniquement dans leur structure profonde, mais émerge de la manière dont les composants matériels et immatériels sont combinés dans des formes hybrides* [20, p.8]. Cela veut dire que la structure profonde (fonctionnement, objectifs poursuivis) et de surface (forme, interface) des objets digitaux vont aussi façonner les interactions et la relation HT (ou les composantes socio-matérielles selon les auteurs) [304], ce qui nous intéresse pour la conception de la collaboration HT.

2.6 Synthèse des enjeux et concepts retenus

Recker et coll. [20] ont posé les bases d'un renouvellement théorique pour élargir la fonction des MC dans les processus de DA. Nous empruntons le concept de médiation digitale pour l'adapter à d'autres artefacts de conception comme vu au Tableau 2.7, et ce pour proposer de nouvelles orientations théoriques et pratique (outils, techniques et méthodes) dans l'approche de la DA en équipe multidisciplinaire. Notre modèle conceptuel initial est présenté à la Figure 2.11. Il repose sur un croisement entre les résultats d'analyses de l'existant - centré sur le système de travail (contexte d'usage, caractéristiques du domaine et utilisateurs) [13, 19] et les résultats de l'analyse du projet de conception [19, 247] dans le but d'aligner les analyses ergonomiques avec les objectifs de conception poursuivis. Cette compréhension du domaine, par l'analyse ergonomique du travail [16], génère un corpus de connaissances qui, avec la compréhension des objectifs du projet, sont transformées en objets de conception [7]. Ainsi, les objets de conception sont l'épicentre de cette thèse. Ils permettent de traverser le golfe de conception en intégrant (1) les intentions de conception ; et (2) les exigences fonctionnelles du domaine dans le processus d'idéation des solutions futures [13] qui comprend les objets de conception [275]. Pour rappel, le golfe de conception est défini comme l'écart qui existe entre le système existant et le système futur. En définitive, le but est de comprendre comment ces objets intermédiaires influencent la conception et les concepteurs [248] ; supportent la

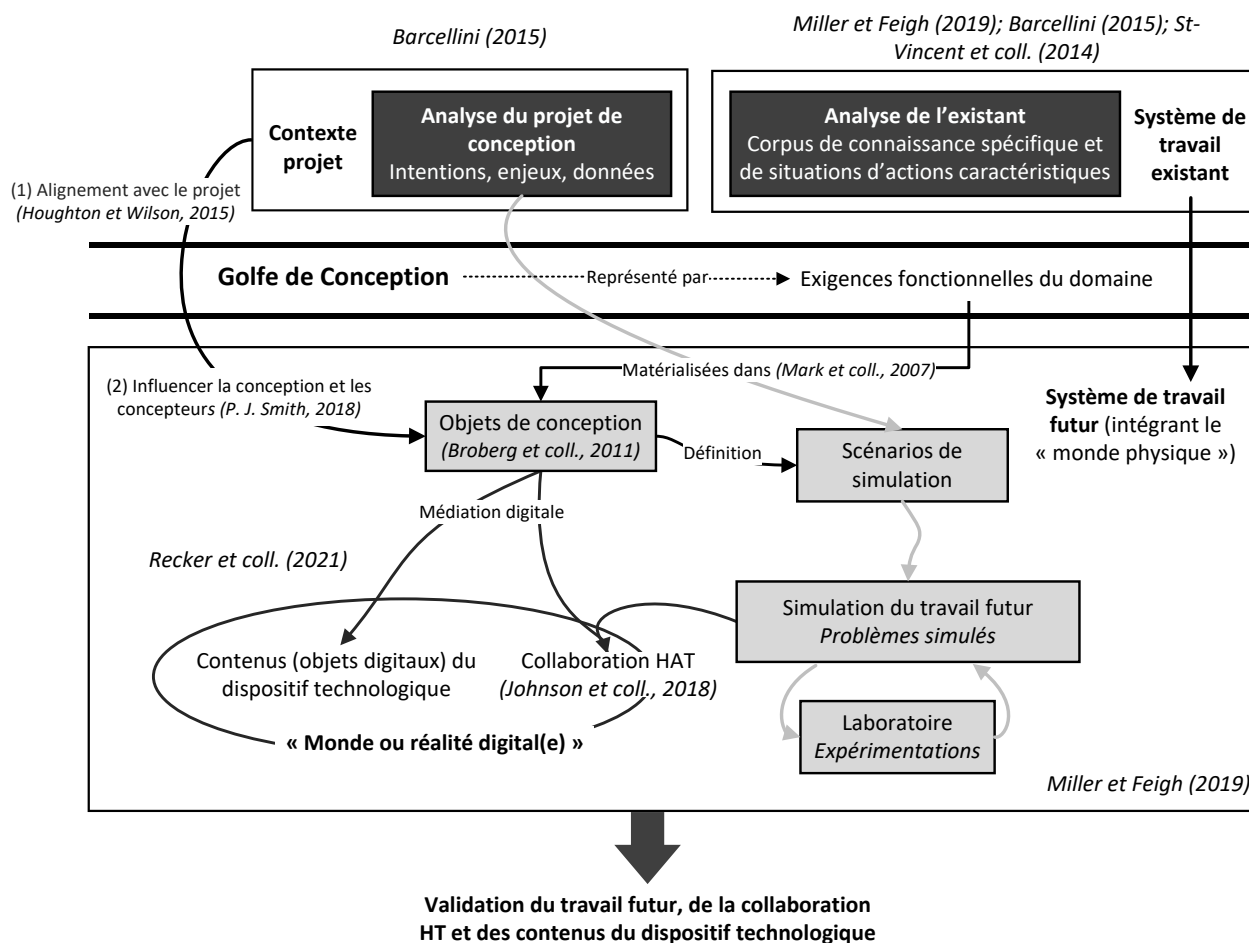


FIGURE 2.11 Modèle conceptuel pour l'enrichissement des méthodes en ergonomie de conception par la médiation digitale. Adapté de [13], [19] et [20].

conception/définition des scénarios de simulations réalistes [301], ainsi que la collaboration HT [20,63] et assurent l'intégration des exigences fonctionnelles du domaine dans les contenus du dispositif technologique (médiation digitale) [20,275]. Ils fournissent aussi un moyen de renverser des fixations de conception [284] "technocentrée" vers une approche de conception "plus anthropocentrée" et "axée sur le travail" (*work-driven approach*) [13,19]. Les simulations et expérimentations permettent ultimement de valider le travail futur, les modalités de collaboration HT et les contenus du dispositif technologique.

CHAPITRE 3 INTRODUCTION À L'INSPECTION INDUSTRIELLE

*"C'est notre œil et notre regard qui
nous dicte notre façon d'agir"*

Gerhard Moeller

L'inspection industrielle vise à assurer le contrôle de la qualité des extrants produits [9, 109, 307]. C'est une étape importante dans les entreprises manufacturières étant donné que la satisfaction des clients passe par la distribution d'un produit qui remplit leurs attentes [308]. Ce constat est d'autant plus vrai dans les compagnies où le coût d'une non-qualité peut avoir des conséquences importantes comme dans le secteur aéronautique ou le milieu médical [8]. En effet, en prenant le contexte de cette thèse qui concerne la maintenance de moteur d'aéronef, la fiabilité des pièces produites ou remises à neuf dépend du respect des spécifications, et l'omission d'un défaut peut mener à des conséquences fatales [8, 9, 309]. Étant donné l'exposition constante de ces moteurs à *des conditions de fonctionnement extrêmes, incluant des forces centrifuges élevées, des pressions élevées, des températures élevées, des dommages dus à des corps étrangers [...] et des vibrations* [310, p.1], ils sont inspectés sur une base régulière, fixée par des seuils prédéterminés (temps de vol avant inspection en atelier). La survenue d'épisodes imprévus, tels que des problèmes mécaniques ou une collision avec des oiseaux peut devancer une visite à l'atelier d'inspection [311]. Les procédures standards de l'OEM (Original Equipment Manufacturer) et de la compagnie qui oeuvre en maintenance aéronautique documentent la qualité attendue du produit, les types d'anomalies de surface qu'on peut retrouver ainsi que les critères d'acceptation de qualité [312]. L'évaluation des déviations vis-à-vis d'un standard défini s'exécute au travers d'une tâche d'inspection « visuelle » réalisée par un opérateur (appelé inspecteur) [312]. Celui-ci se charge de détecter les défauts présents sur la pièce et de les comparer avec les standards en vigueur afin de décider du statut du défaut et de la pièce (acceptation telle quelle, réparation ou refus) [6].

3.1 Caractérisation de la tâche d'inspection industrielle

Dans la littérature, lorsqu'on s'intéresse à l'activité d'inspection, on réfère plus particulièrement à « l'inspection visuelle » (ou *visual search*) bien que plusieurs auteurs mentionnent la prise d'information multisensorielle de cette activité [6, 313]. En effet, *Spencer* [314, p.2] définit l'inspection industrielle comme "the process of examination and evaluation of systems and components by use of human sensory systems [...] including looking, listening, feeling,

smelling, shaking, and twisting". Même si la prise d'information visuelle reste le canal d'entrée principal (estimée entre 80% et 90% [315,316]), la discrimination tactile (le « toucher ») est mentionnée par plusieurs auteurs comme étant un sens important dans l'activité d'inspection industrielle dans le domaine aéronautique, notamment pour identifier la présence ou la classe d'une anomalie [6, 8, 310, 316, 317]. L'examen tactile de la pièce comprends une palpation fine de la pièce en question avec la palme de la main ou le bout des doigts afin de détecter des anomalies, des déformations ou des irrégularités des surface [310]. Il vise généralement à corroborer les inférences du canal visuel, notamment au niveau des anomalies pouvant être difficilement perceptible à l'oeil nu [310]. D'ailleurs, de très récentes études menées en contexte industriel démontrent l'efficacité de la combinaison visuelle-tactile dans l'activité d'inspection en maintenance aéronautique, comparativement à l'usage du canal visuel seulement [316]. On retrouve aussi des exemples d'inspection perceptivo-motrice dans la littérature où des opérateurs utilisent des probes ou des stylets, comme extension de leur main et augmentation de leurs capacités perceptives, pour détecter la présence d'anomalies dans des études expérimentales d'inspection de cylindres métalliques [318].

Drury et coll. [317] formalisent un modèle de l'inspection industrielle en 5 étapes : préparation du poste de travail, acheminement de la pièce à inspecter, recherche d'anomalie, prise de décision et actions découlants de la décision. Ce modèle met particulièrement l'accent sur les opérations de recherche visuelle (visual search) et prise de décision (decision-making process) de l'activité d'inspection [319]. C'est en effet dans ces deux étapes que l'on retrouve le plus d'erreurs [6], et de fonctions et processus macrocognitifs [8, 310, 316] :

- Perception et reconnaissance de patron : discrimination de « vraies » anomalies parmi le bruit [8]
- Prise de décision dynamique : une décision n'est jamais isolée et entraîne une « cascade » de sous-décisions qui s'influencent entre elles [320]
- Jugement et raisonnements à base de cas antérieurs pour traiter des cas de figure nouveau : interprétation et croisement des données de la situation, avec les standards et les cas d'expériences passées pour atteindre un résultat satisfaisant [321]
- Évaluation de la situation : adaptation aux exigences variables de la situation pour passer de l'état initial à l'état souhaitable [217]

Lors de l'étape de recherche visuelle, l'inspecteur scrute la pièce à la découverte d'éléments saillants, c'est-à-dire, d'anomalies potentielles (processus ascendant ou bottom-up). Mais cette recherche va aussi être guidée par les objectifs de la tâche en cours et court-circuitée par des connaissances de haut-niveau (processus descendant ou top-down) comme par exemple,

l'inspection préliminaires des zones de la pièce où se retrouvent généralement le plus de défaut [8, 322]. L'expérience de l'inspecteur joue un rôle important dans sa capacité à identifier un défaut parmi le bruit présent sur une pièce, c'est-à-dire, distinguer sans analyses subséquentes un défaut jugé acceptable dans les standards, d'un défaut nécessitant d'être potentiellement réparé ou refusé [8]. La phase de recherche visuelle se termine quand l'inspecteur va détecter un défaut, finit son analyse systématique ou quand il perçoit que le temps supplémentaire passé à examiner la pièce n'a plus de valeur ajoutée [8]. Les résultats du processus de prise de décision peuvent être modélisés statistiquement par la théorie de détection du signal (TSD) [8, 322] :

"In short, TSD maintains that a defect may be missed because the inspector's perceptual ability to detect that defect was low or because the inspector adopted a conservative response bias (with an inclination to classify most items as good and only a few, with extremely large and salient flaws, as defective.)" [8, p.19]

Cette théorie évoque quatre résultats possible suivant une décision (Tableau 3.1). Les critères de réussite sont le rejet correct (H) d'un véritable défaut et la détection réussie d'un défaut présent (CA). Les deux autres choix correspondent aux erreurs : l'erreur de type I consiste à juger un objet valide comme défectueux (fausse alarme). L'erreur de type II est caractérisée par l'omission (Miss) d'un défaut présent sur la pièce. La TSD mesure la propension d'un inspecteur à faire de bonnes ou mauvaises décisions et classifie les inspecteurs selon leur attitude décisionnelle : neutre, conservateur ou "progressiste" [8, 9]. L'inspecteur au comportement plutôt "conservateur" aura tendance à faire plus de fausses alarmes que d'omission. Le comportement progressiste se traduit par l'opposé : le sujet réalisera plus d'omission mais peu de fausses alarmes. Enfin, le sujet neutre se situe au milieu des deux droites de distributions et ne reportent aucun biais vis-à-vis des décisions accepter ou rejeter [8, 9]. Le taux d'erreur d'un opérateur humain est estimé entre 20% et 30% avec une plus forte proportion d'omissions que de fausses alarmes [323]. Ces conclusions proviennent cependant de calculs

TABLEAU 3.1 Les quatre décisions possibles selon la théorie de détection du signal. Selon [8]

Réponses	Condition Actuelle	
	Produit défectueux (condition signal et bruit)	Produit correct (condition bruit)
Rejeter	Rejet correct ou <i>Hit</i> (H)	Fausse Alarme (FA)
Accepter	Omission ou <i>Miss</i> (M)	Détection correcte (CA)

statistiques, généralement réalisés en laboratoire. Elles sont centrées sur les composantes perceptives des opérateurs et les résultats de la prise de décision : succès ou échec. Cependant, le

processus de prise de décision est peu abordé dans la littérature [6], soit la manière dont les inspecteurs, dans des situations de travail effectives, mobilisent un ensemble de fonctions et processus macrocognitifs : la recherche, l'utilisation et l'interprétation de plusieurs sources et contenus d'informations dans les processus décisionnels (et parfois contradictoire) ; l'adaptation et les compromis réalisés par les experts pour répondre aux dynamiques opérationnelles ; l'influence des contraintes du domaine sur le raisonnement des opérateurs [324] ou encore les connaissances tacites mobilisées. À ce sujet, une récente étude a évalué à 30% le niveau de connaissances tacites mobilisées dans la phase de recherche visuelle et environ 40% dans la phase de décision [6]. Dans la phase de recherche, les connaissances tacites se retrouvent dans les patrons de mouvements visuels employés par les inspecteurs, la reconnaissance de signaux (cues), ou encore l'inspection prioritaire des zones critiques d'une pièce qui engendrerait son rebutage si un défaut non acceptable s'y retrouvait [6]. Dans la phase décisionnelle, ces connaissances se retrouvent dans les heuristiques et les stratégies qu'utilisent les inspecteurs pour faire face aux contraintes temporelles ou pour éviter des coûts de production élevés avec des réparations de haut calibre [6, 308]. *Johnson et coll.* [6] affirment d'ailleurs qu'il est primordial de capturer ce patrimoine de connaissances avant tout projet de DA en inspection industrielle, sous peine de déclencher un double oubli du travail en conception : le "travail réel" (p ex. gestion de la variabilité opérationnelle et mobilisations des connaissances tacites) et le "travail futur" (p. ex. collaboration HT) [6, 325].

La performance des inspecteurs est influencée par de nombreux facteurs techniques, individuels, organisationnels, environnementaux ou sociaux [8] comme en atteste le Tableau 3.2. Ainsi, de nombreux facteurs contextuels et de fonctions macrocognitives sont difficilement reproductibles en laboratoire. Par exemple, les processus de prises de décision de l'inspecteur ont aussi été étudiés et nuancés au regard d'une perspective économique par plusieurs études [308, 326]. Ainsi, les inspecteurs seraient des *agents rationnels économiques* qui considèrent à la fois, le coût que pourrait entraîner une erreur d'inspection, la difficulté de la décision et/ou la probabilité qu'un objet puisse être défectueux dans leurs processus décisionnels. Cette influence "économique" peut modifier la sélection du cours d'action et expliquer les écarts entre l'activité d'inspection réelle et les cahiers de procédures. Par exemple, le coût de réparation d'une pièce peut surpasser le coût de remplacement, ce qui incitera l'opérateur à opter pour la 2ème option. Nous remarquons que les connaissances sur l'activité d'inspection qui ressortent de la littérature se sont surtout concentrées sur le résultat de l'activité, soit la performance des inspecteurs à détecter ou non un défaut et beaucoup moins sur une description et une compréhension fine de leurs modes opératoires pour en arriver à cette performance. D'ailleurs, il nous semble pertinent de combler ce fossé de connaissances en étudiant aussi les mécanismes collaboratifs mis en oeuvre dans l'activité d'inspection,

notamment comment l'inspecteur s'intègre dans un système sociotechnique.

TABLEAU 3.2 Facteurs affectant la performance de l'inspection. Adapté de [8] et [9].

Facteurs	Exemples
Techniques	Types de défauts ; visibilité du défaut ; niveau de qualité visé etc.
Individuels	Âge ; sexe ; acuité visuelle ; méthodes de travail ; expérience etc.
Organisationnels	Entraînement des effectifs ; rétroaction ; précision des instructions etc.
Environnementaux	Bruit ; lumière ; horaires de travail ; températures etc.
Sociaux	Communication ; pression ; isolement ; primes de travail etc.

3.2 Automatisation de l'inspection

L'automatisation de l'inspection est une solution convoitée pour augmenter les performances de l'inspection industrielle [319]. Alors que les humains semblaient mieux performer que les machines jusqu'à la fin des années 90, la tendance s'est équilibrée dans les années 2000 [327]. Plusieurs études ont montré que les prototypes de système d'inspection automatisé atteignaient une performance de 98% avec un taux de fausse alarme d'environ 2% [328, 329]. Dans la même lignée, une récente étude montre que dans les tâches de détection d'anomalie, les systèmes technologiques utilisant des scanners 3D dépassent les performances humaines (84% de précision d'inspection pour les humains contre 100% pour le scanner 3D) [10]. Ces résultats sont cependant à interpréter avec précaution selon *Agnisarman et coll.* qui passe en revue 53 études portant sur l'inspection industrielle [109] :

- Bons nombres d'études se sont déroulées en laboratoire et manque de validité externe
- La fonctionnalité de ces systèmes est mise à l'épreuve sur des surfaces planes et simples à défaut de composantes plus complexes, comme cela peut être le cas sur des ailettes de moteur d'aéronefs
- Aucune des 53 études ne mentionne les contraintes ou limites que posent ces dispositifs technologiques sur les opérateurs humains. Les aspects de collaboration humain-machine, d'allocation des fonctions, de conscience de la situation ne sont pas abordés
- En accord avec le modèle d'inspection à cinq étapes de *Drury* [317], ces technologies ne supportent pas la tâche de décision des inspecteurs (étape 4), seulement celles de recherche visuelle (étape 3). La classification des types de défauts est aussi réalisée par les systèmes les plus avancés (étape 4.1) [329–331]. Durant cette phase, l'inspecteur acquiert, interprète et transforme de multiples données "physiques" (procédures papier) et informatisées présentes dans son environnement. Cette décision repose sur un ensemble

de fonctions macro-cognitives de construction de sens (*sensemaking*) qu'il est difficile d'automatiser à l'heure actuelle [220]

- Si le système n'est pas complètement automatisé alors il reste subordonné à l'humain et agit comme un assistant qui assure une partie des tâches et fonctions que l'humain occupé précédemment. Une forme de collaboration et de partage d'autorité est alors à concevoir, tester et implémenter pour concevoir une symbiose HT [263, 332, 333].

Pour conclure cette section, le tableau 3.3 recense les avantages et limitations des entités humaines et technologiques pour la tâche d'inspection industrielle. Nous trouvons intéressant qu'à la suite de leur étude comparative, les auteurs soulignent les limitations technologiques induites par un manque de connaissances contextuelles, de compréhension générale et de compréhension de l'impact des décisions prises [10]. Cela laisse sous-entendre que les inspecteurs devront combler ces déficiences technologiques dans des logiques de collaboration HT.

TABLEAU 3.3 Forces et faiblesses des inspecteurs humains par rapport aux technologies avancées dans la tâche d'inspection industrielle. Traduit de [10]

	Inspecteur humain	Technologies avancées
Forces	Fait preuve de bon sens	
	Processus et fonctions cognitives décisionnels sophistiqués	Disponibilités 24/7
	Fortes habiletés cognitives	Meilleure répétabilité du système
	Versatilité	Décisions non biaisées et rationnelles
	Intelligence générale	Excelle dans le traitement de grandes quantités de données et hautement dimensionnelles
	Capacités à poser des questions et surmonter l'incertitude	
Faiblesses	S'améliore avec l'expérience	
		Manque de connaissances contextuelles
		Difficultés avec les décisions demandant une compréhension générale
	Limitations physiques et cognitives	Coût d'implantation élevé
	Sujet à l'erreur et à la subjectivité	Requiert souvent l'assistance d'autres technologies (coûts supplémentaires)
	Inconsistance	Dépendance technologique
		Peut engendrer une complaisance et une fainéantise chez l'opérateur humain
		Manque de compréhension de l'effet de la décision (<i>look-ahead</i>)

CHAPITRE 4 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Ce chapitre vise à préciser l'approche de recherche utilisée pour répondre à notre problématique de recherche. Les caractéristiques du projet de R&D dans lequel s'insère cette thèse, de même que le contexte organisationnel de l'entreprise bénéficiaire de la technologie sont présentés dans cette section.

4.1 Problématique et objectifs de recherche

La revue de littérature a souligné trois points cruciaux guidant la problématisation de ce travail de recherche. Premièrement, les grands projets de R&D suivent bien souvent des approches de conception technocentrées. Ces approches s'intéressent exclusivement aux développements des composants matériels et logiciels. Bien que nécessaires, elles ne prennent pas en compte les caractéristiques du contexte d'utilisation et des utilisateurs finaux. Les risques encourus par cet écueil, bien documenté et remis à l'ordre du jour avec les défis autour de l'opérationnalisation de l'IA, peuvent engendrer une inadéquation tâches-technologie-contexte compromettant l'intégration de la technologie aux opérations [69]. Dans une perspective d'I5.0 où humains et systèmes automatisés sont amenés à coopérer, il nous paraît essentiel d'intégrer l'humain et son activité de travail dans les variables de conception. Et ainsi de transiter d'une démarche de conception "axée sur la technologie" (*technology-driven approach*) vers une approche "axée sur le travail" (*work-driven approach*) pour anticiper et accompagner les transformations des situations de travail engendrées par l'automatisation [68].

Deuxièmement, la complexité des projets de DA nécessite de recourir à plusieurs disciplines pour tenir compte simultanément des enjeux techniques, humains, sociaux, organisationnels et opérationnels. Ces équipes multidisciplinaires font face à des défis de collaboration importants liés à l'établissement d'un référentiel commun et au croisement de leurs perspectives disciplinaires dans le système final. Le recours aux objets de conception semble être une passerelle privilégiée pour structurer et supporter le travail collaboratif de conception. Ces médias facilitent la communication et la synchronisation cognitive (partage d'un référentiel commun) et opératoire (coordination des actions et co-action) entre concepteurs [55, 252]. Cependant les objets et cadres de conception actuels sont limités dans leurs habiletés à matérialiser les caractéristiques de l'espace-problème de l'I5.0 (p. ex. conception des situations de travail en équipe humain-automatisation). Il est ainsi nécessaire de développer des objets et cadres de conception qui accompagneront les équipes multidisciplinaires dans la considération des

transformations sociales et opérationnelles qui entourent les projets de DA.

Troisièmement, les grandes tendances de recherche de l'I5.0 portent sur (1) le développement de mécanismes technologiques en laboratoire pour améliorer l'interactivité des produits ou (2) sur le développement d'approches de conception intégrées sans données empiriques. La littérature affirme qu'il est primordial de venir suppléer et raffiner les démarches de conception sociotechniques par des données empiriques provenant d'études de cas industriels. En effet, il n'existe à notre connaissance aucune étude ayant documenté les aspects situés des projets d'industrialisation 5.0 soulignant les méthodes, outils et approches conciliant développement technologique et reconfigurations écologiques de situations de travail.

Pour répondre aux trois limites précédentes, nous explorons dans cette thèse les moyens et possibilités de reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie dans un projet de digitalisation et d'automatisation (DA) industrielle. Plus spécifiquement, ce travail de recherche s'intéresse aux processus de transformation et d'utilisation des données provenant de l'Analyse Ergonomique du Travail (AET) en objets de conception pour (1) supporter le développement du dispositif technologique ; (2) intégrer les propriétés du domaine dans les contenus de conception et (3) guider la conception des futures situations de travail incluant les aspects de collaboration HAT. Ce travail de recherche s'est construit autour d'un projet de R&D de trois ans et demi visant à automatiser l'inspection industrielle de pièces d'avion dans le domaine aéronautique. La section suivante détaillera les caractéristiques de ce projet.

L'objectif général de cette thèse se décline en trois objectifs spécifiques (Figure 4.1) :

1. Analyse de l'existant et du projet de R&D : mettre à plat et cartographier l'activité de travail des inspecteurs, notamment les mécanismes macrocognitifs (p. ex. processus de décision et d'interprétation des informations) et ses déterminants. Éliciter les besoins, objectifs et jalons poursuivis par les concepteurs
2. Établir un processus de médiation digitale des données issues de l'analyse de l'existant en objets de conception qui incorporent les propriétés du domaine (contraintes du domaine, tâches effectives, règles métier et exigences opérationnelles) et favorisent une approche de conception "axée sur le travail"
 - (a) Médiation digitale 1 : objets de conception centrés sur le développement des composants logiciels et des structures profondes du dispositif technologique
 - (b) Médiation digitale 2 : objets de conception centrés sur la (re)configuration du futur système de travail incluant les inspecteurs et la technologie dans des logiques de collaboration HAT

3. Construction d'un cadre de conception reliant les situations d'usages futures et le développement algorithmique de l'intelligence artificielle explicable.

La Figure 4.1 résume les objectifs de cette thèse et définit les questions spécifiques de recherche en lien avec les articles scientifiques rédigés dans le cadre de cette thèse.

Objectif général	Explorer les moyens et possibilités de reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie dans les projets de digitalisation et d'automatisation industrielle					
Objectifs spécifiques	Analyse de l'existant Analyser le travail d'inspection industrielle et le contexte du projet de R&D	Médiation digitale 1 Transformer les données en objets de conception pour le dispositif technologique	Médiation digitale 2 Générer des outils, objets et méthodes pour anticiper et concevoir les caractéristiques des futures situations de travail, incluant la collaboration humain-technologie		Cadre de conception Développer un cadre de conception reliant les situations d'usages futures avec le développement algorithmique pour l'intelligence artificielle (IA) explicable	
Questions de recherche	1- Comment les inspecteurs diagnostiquent-ils l'état des pièces d'avion dans le domaine de la maintenance des aéronefs ? 2- Quels sont les moments, le format et la nature des connaissances sur l'activité de travail d'inspection dont les concepteurs ont besoins durant le cycle de conception ?	Comment abstraire les connaissances opérationnelles sur le travail d'inspection et le contexte organisationnel, et les aligner avec les jalons technologiques poursuivis ?	Comment anticiper et concevoir les caractéristiques du futur système de travail via la transformation des données issues de l'analyse de l'existant ?	Quels sont les objets et outils de conception qui facilitent ce pronostic ?	Quelles sont les composantes d'un cadre de conception reliant développement algorithmique et futures situation d'usages pour l'IA explicable ?	Comment relier ces composantes entre-elles dans un espace de conception ?
Article #	Article 1		Article 2		Article 3	

FIGURE 4.1 Objectifs, questions de recherche et articles

4.2 Contexte du projet de R&D

Cette thèse s'inscrit dans un projet de R&D dans le milieu de l'entretien, de la réparation et de la révision générale (MRO) des moteurs d'aéronef. Ce projet de R&D, intitulé SARA (Système d'Analyse et de Réparation Automatisée), vise à produire et valider un système cyber-physique pour automatiser une portion du processus d'inspection industrielle. Ainsi, un consortium pluridisciplinaire d'acteurs industriels et d'académiques a été composé pour mener à bien ce projet (Figure 4.2). Chaque acteur joue un rôle bien spécifique, mais une étroite collaboration entre institutions est attendue pour développer et intégrer les sous-systèmes entre eux. Le bénéficiaire de ce projet, Rolls-Royce Canada (RRC), filiale du groupe Rolls-Royce, est un chef de file mondial dans le domaine de la MRO. Sa division montréalaise, la plus importante au Canada, comprend 1050 employés opérant dans la remise en état de moteurs civils et militaires. Cette usine constitue le contexte organisationnel dans lequel la base empirique de cette thèse provient : collecte de données sur l'activité de travail des inspecteurs et les contraintes du domaine (règles métiers, procédures etc.), ainsi que quelques entretiens de groupes avec les concepteurs et ingénieurs de l'usine.

En 2011, Rolls-Royce UK a initié le lancement du projet de R&D initialement intitulé *Automated Visual Inspection, Sentencing & Dressing*. Cette portion du projet a été menée avec

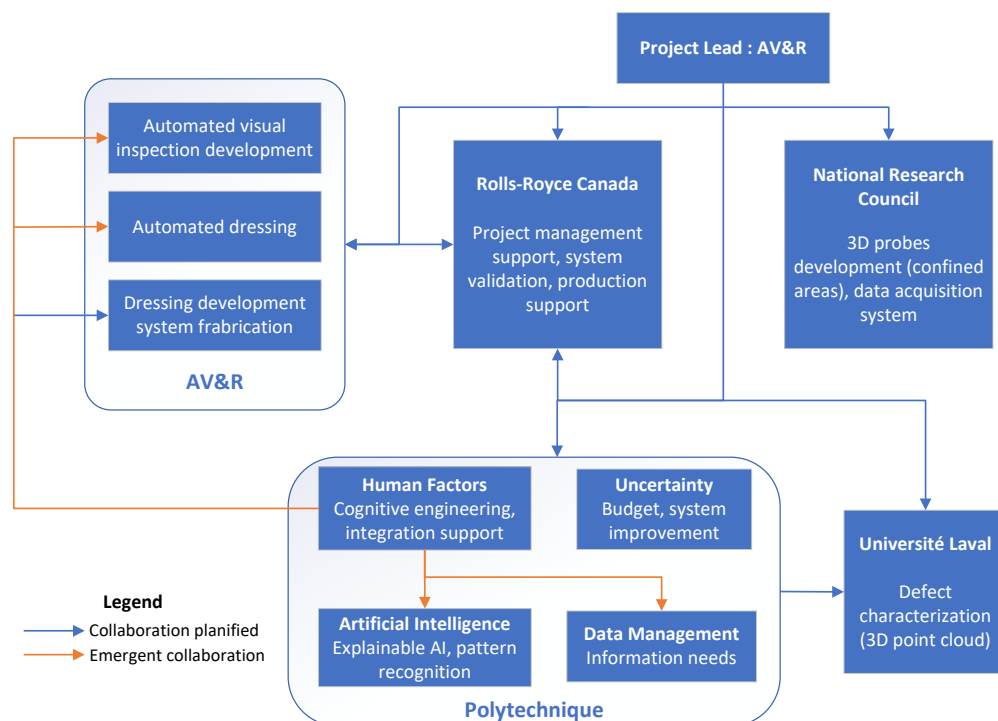


FIGURE 4.2 Collaboration planifiée et émergente entre les parties prenantes du projet SARA

succès jusqu'au *Technology Readiness Level*¹ 3 (ou TRL 3 - Tableau 4.1). En partant de cette preuve de concept, l'objectif du projet SARA repris par la filiale canadienne est de poursuivre les développements jusqu'au TRL 6, c'est-à-dire, de démontrer le fonctionnement d'un prototype dans un environnement simulé.

Étant donné la flotte de composantes d'aéronef chez RRC, le projet s'est focalisé sur 3 pièces : les aubes de ventilateur (Fan Blades), les arbres et les disques de turbine à gaz (HPT Shaft et Disk). Ces pièces ont été choisies pour leurs habiletés à représenter l'ensemble des unités de l'entreprise : zones planes, zones obstruées, endroits difficiles d'accès etc. Une partie des composants matériels et logiciels de SARA étaient déjà conçues lorsque nous sommes arrivées sur le projet (TRL 3). Conscient que certains programmes informatiques sont le résultat de plusieurs années de travail, notre mandat industriel s'est organisé autour de ces contraintes techniques et des besoins du projet. La définition de notre mandat industriel s'est établie et enrichie via les discussions avec les acteurs du projet SARA et les évolutions du projet. Les ingénieurs d'AV&R ont rapporté des problèmes d'acceptabilité dans des projets antérieurs.

1. Technology Readiness Level est un système de mesure de maturité technologique inventé par la NASA en 1995. Pour résumer, ce système fonctionne comme une approche par palier où des critères sont spécifiés pour passer au palier suivant. On dénombre 9 niveaux allant d'une revue de littérature jusqu'à l'implémentation réussie de la technologie en milieu opérationnel

TABLEAU 4.1 Niveaux de maturité technologiques (*Technology Readiness Level*). Tiré de *Innovation, Sciences et Développement économique Canada*.

Niveaux	Description
Niveau 1 : Observation et consignation des principes de base du concept	La recherche scientifique commence à donner lieu à la recherche appliquée et au développement. Les activités pourraient inclure des études sur les propriétés de base d'une technologie.
Niveau 2 : Concept technologique ou application déterminés	Début des inventions. Une fois les principes de base observés, il s'agit d'inventer les applications pratiques. Les activités sont limitées à des études analytiques.
Niveau 3 : Fonction critique et analytique ou validation de principe (preuve de concept)	La recherche-développement active démarre. L'étape doit comprendre des études analytiques et/ou des études en laboratoire. Les activités pourraient inclure des composants qui ne sont pas encore intégrés ou représentatifs.
Niveau 4 : Validation des éléments ou d'une maquette dans des conditions d'essai	Les composants technologiques de base sont intégrés pour valider le bon fonctionnement commun. Les activités incluent l'intégration en laboratoire de matériel spécial.
Niveau 5 : Validation des éléments ou d'une maquette dans un environnement simulé	Les composants technologiques de base sont intégrés, aux fins d'essais dans un environnement simulé. Les activités incluent l'intégration de composants de laboratoire.
Niveau 6 : Démonstration d'un modèle ou d'un prototype du système ou du sous-système dans un environnement simulé	Un modèle ou un prototype qui représente une configuration quasi souhaitée. Les activités incluent l'essai dans un environnement opérationnel ou un laboratoire simulé.
Niveau 7 : Prototype prêt pour la démonstration dans un environnement opérationnel approprié	Prototype à l'état opérationnel. Nécessite la démonstration d'un prototype réel dans un environnement opérationnel. Les activités incluent l'essai du prototype sur le terrain.
Niveau 8 : Technologie actuelle mise au point et qualifiée par des essais et des démonstrations	Il est prouvé que la technologie fonctionne dans sa forme finale et dans les conditions prévues. Les activités incluent des essais de mise au point et des évaluations afin d'établir s'il répond aux exigences opérationnelles.
Niveau 9 : Validation de la technologie réelle par le déploiement réussi dans un contexte opérationnel	Application concrète de la technologie dans sa forme finale et dans des conditions réelles, comme celles s'appliquant au cours des essais et de l'évaluation opérationnels. Les activités incluent l'utilisation de l'innovation dans des conditions de conduite opérationnelle.

Une des raisons identifiées concernait le décalage entre les résultats fournis par le système automatisé et les attentes des utilisateurs (*expectation mismatch*). En étant confrontée au choix d'acceptation ou de refus du dispositif technologique par l'inspecteur, la problématique n'est plus seulement technique, mais comporte aussi une dimension socio-organisationnelle [224]. De plus, les intentions initiales étaient d'automatiser le processus d'inspection au complet. La mise à plat de la complexité du travail d'inspection et sa mise en relation avec les capacités de SARA ont fait évoluer la direction du projet. Ainsi, la finalité est de concevoir une technologie qui supporte les inspecteurs dans leurs pratiques quotidiennes. Le système automatisé

s'inscrit alors dans une logique d'augmentation des capacités humaines via la collaboration HT plutôt que de remplacement. Il est primordial de reconcevoir un système de travail qui permette et facilite cette collaboration, en tenant compte des forces et faiblesses de chacune des entités. Une autre difficulté relatée par les ingénieurs du projet concerne l'automatisation de procédés hautement manuels à forte composante cognitive (détection, classification, interprétation d'informations multiples, diagnostic, résolution de problème etc.), reposant sur un ensemble de connaissances tacites acquises par des années de pratique et d'interaction avec l'environnement opérationnel. Ces connaissances n'apparaissent pas toutes dans les cahiers de procédures. De plus, elles ont été formulées initialement pour une interprétation humaine qui ne se transpose pas forcément bien dans des programmes informatiques.

Nous avons obtenu un avis favorable *ex post facto* à l'utilisation des données de recherche par le Comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal pour la Phase 1, puis un certificat d'approbation éthique (CER-2122-28-D) pour les Phases 2 et 3. De plus, avant chaque activité de collecte de données des Phases 1, 2 et 3, le consentement oral des participants était systématiquement obtenu avant d'être observé, interviewé et/ou enregistré. Il leur été également demandé si les données obtenues pouvaient être utilisées ultérieurement à des fins de conception ou de publication.

Finalement, un élément contextuel important à relever provenant de la recherche en milieu naturel concerne le *lock-out* à RRC ayant eu lieu vers la fin du projet (mars 2022). Cet événement a compromis les essais d'utilisabilité que nous voulions réaliser avec les inspecteurs, et a nécessité des réajuster nos jalons.

4.3 Démarche générale de recherche

La méthodologie préconisée dans cette thèse s'inscrit dans les approches qualitatives de recherche, plus spécifiquement à la croisée entre la recherche-action et l'étude de cas [334]. Ce croisement méthodologique est adapté pour fournir une compréhension approfondie d'un cas en milieu naturel, que ce soit un événement, une organisation ou un projet spécifique [74]. Notre unité d'analyse pour ce travail de recherche est délimitée par le contexte du projet de R&D, soit les objectifs de développement poursuivis, les échéanciers, les acteurs qui y participent et le site industriel dans lequel la technologie sera déployée, soit le travail d'inspection industrielle et les acteurs qui y contribuent (recherche-action).

Étant donné la volonté transformatrice et très située qui émane des objectifs de recherche, notre démarche générale est aussi combinée aux sciences de la conception [335]. Plus spécifiquement, nous nous appuyons sur le courant de la recherche-action en conception (RAC)

(ou *action design research*) [22, 336]. Ce croisement méthodologique entre recherche-action et sciences de la conception reconnaît l'influence des caractéristiques du milieu organisationnel sur la conception et l'évolution de la technologie, et met l'accent sur la construction, l'intervention et l'évaluation simultanées dans le milieu organisationnel [336]. Cette approche nous permet à la fois de nous immerger en profondeur dans le contexte organisationnel et dans le cycle de R&D du dispositif technologique pour adresser une situation problématique, proposer des solutions et tenter de généraliser les solutions à une classe de problème spécifique [22]. À noter que des détails méthodologiques sont précisés dans les articles scientifiques et complètent la description des différentes phases de la démarche générale de recherche présentée dans ce chapitre. Ceci étant posé, notre démarche générale, croisée avec le paradigme de RAC se divise en quatre grandes phases :

- Phase 1 - *Construction de l'énoncé initial du problème de conception* (appelé "diagnostic" par Mullarkey et coll. [22]) : Étude de l'existant (domaine de travail et contexte du projet SARA)
- Phase 2 - *Design et Implémentation* [22] : Processus de médiation digitale des données issues de l'analyse de l'existant en objets de conception centrés sur le dispositif technologique
- Phase 3 - *Design et Implémentation* [22] : Processus de médiation digitale des données issues de l'analyse de l'existant en objets de conception centrés sur les situations de travail futures
- Phase 4 - *Design* [22] : Cadre de conception (système d'information et interface utilisateur)

Malgré la formalisation séquentielle des phases de recherche, des itérations intra- et inter-phases ont eu lieu. En suivant les principes de RAC, chaque phase possède des activités d'intervention, de design et d'implémentation concourantes [22, 336]. L'implémentation n'est plus perçue comme une étape distincte qui survient à la fin du processus de développement. Au contraire, *les décisions concernant la conception, le façonnage et le remodelage de la technologie et l'intervention dans les situations de travail de l'organisation devraient être imbriquées dans une forme d'implémentation continue* [336, p.43]. Enfin, de par notre objectif général de recherche, la Phase 1 constitue à la fois notre base de connaissance et notre point de référence sur lequel les phases subséquentes reposent, ce qui a engendré de multiples itérations entre la Phase 1 et les Phases 2, 3 et 4. La Figure 4.3 schématise les différentes phases de recherche et leurs liens. Ces différentes phases de recherche se sont alignées selon les jalons poursuivis dans le projet, le mandat et les livrables industriels que nous devons produire. Ces productions industrielles constituent un apport empirique qui n'ont pas fait l'objet d'articles scientifiques et qui n'apparaissent pas dans la Figure 4.3.

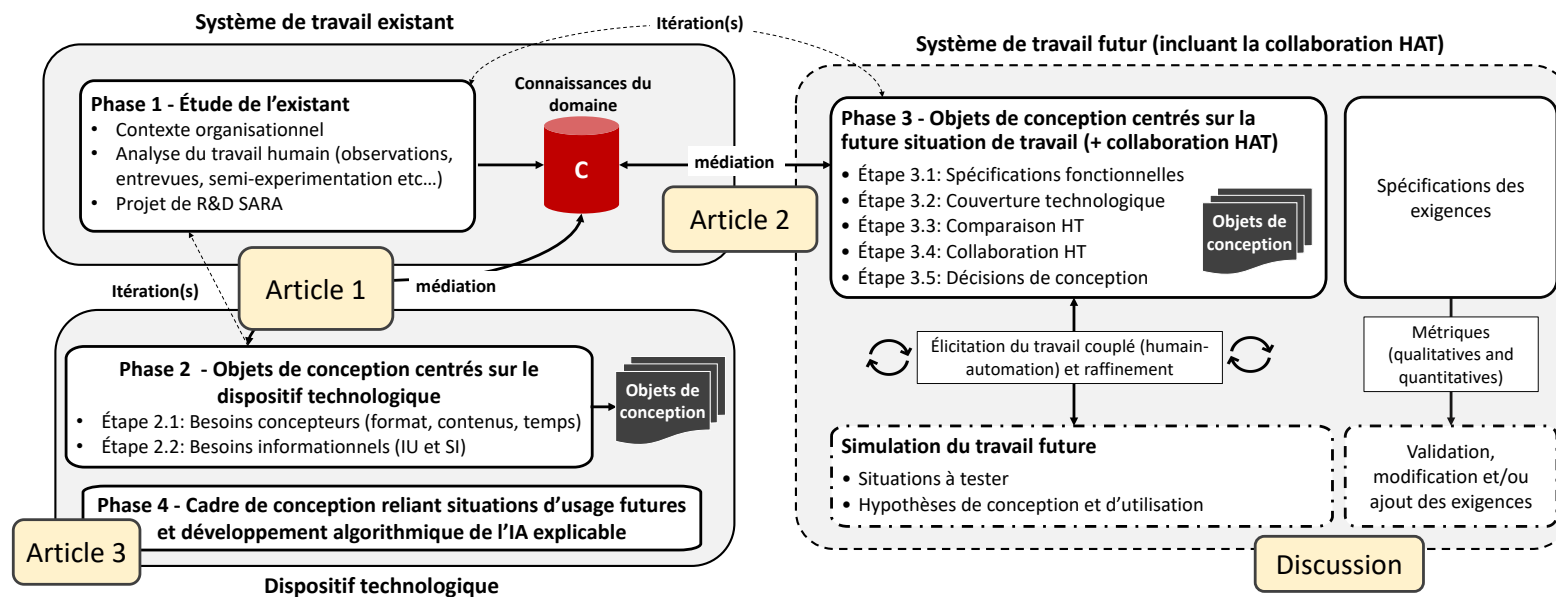


FIGURE 4.3 Schématisation de la démarche générale et l'organisation de cette thèse

4.4 Phase 1 - Construction de l'énoncé initial du problème de conception : étude de l'existant et du contexte de R&D

4.4.1 Objet d'étude

Cette première phase de recherche, plutôt descriptive, constitue la fondation de cette thèse. Au travers une recherche-action de plus de 16 mois en collaboration avec les acteurs académiques et industriels, l'objectif était d'analyser et documenter les éléments pertinents touchant au contexte de projet de R&D SARA :

1. Les caractéristiques du domaine de travail dans lequel la technologie sera déployée
 - (a) À un niveau macro : cela comprend les contraintes, les règles, les procédures standards et la documentation interne, les exigences opérationnelles, les acteurs et leur rôle qui façonne la manière dont le travail d'inspection est réalisé [231]
 - (b) À un niveau micro : soit l'activité de travail des inspecteurs (utilisateurs finaux) dans ses dimensions physique, cognitive et sociale pour comprendre les régulations mis en place, les tâches réelles et les connaissances qu'ils utilisent pour atteindre les objectifs opérationnels [16, 337]
2. Les caractéristiques du projet
 - (a) Le processus de conception : dispositif technologique, les jalons et les phases de développement
 - (b) Les concepteurs du projet (chercheurs, ingénieurs, développeurs) : leurs rôles, objectifs, défis avec des repères temporels [247]

Cette étape visait en outre à obtenir une description détaillée du contexte d'utilisation (utilisateurs, situations de travail et de l'environnement opérationnel) dans lequel la technologie est déployée et du contexte de conception du dispositif technique. Elle a permis de dégager des connaissances fines pour optimiser et orienter la conception du dispositif technique et du futur système de travail [338]. Une revue de littérature complémentaire a aussi été menée pour faire un état des connaissances sur le processus d'inspection industrielle. Notons ici la posture méthodologique choisie : à cheval entre utilisateurs et concepteurs. Cette double compréhension du contexte d'utilisation et du dispositif technique vise à faciliter le processus de médiation digitale en identifiant où et comment les connaissances issues de l'étude de l'existant guideront le processus de conception.

4.4.2 Cadre méthodologique lié à l'analyse du travail humain et la formalisation des connaissances

Notre cadre méthodologique est à la croisée de plusieurs courants théoriques : la macrocognition [339], l'approche systémique des situations de travail [338], l'ingénierie des connaissances [228] et la cognition distribuée [340]. Nous utilisons plusieurs courants de pensée pour analyser et représenter les mécanismes socio-cognitifs complexes d'opérateurs en contexte réel de travail afin (1) d'orienter certains choix de conception pour le futur système de travail ; (2) soutenir les lots de travail des concepteurs-chercheur(e)s du projet SARA (p. ex. caractérisation des défauts) ; (3) assurer l'incorporation des "ontologies du domaine" dans les contenus de conception.

La revue de littérature a mis en lumière les spécificités de deux composantes de notre cadre méthodologique : la *macrocognition* et l'*approche systémique des situations de travail* (ou ergonomie de l'activité). Afin d'éviter trop de redondance entre ces deux sections, nous invitons le lecteur à se référer à la revue de littérature pour obtenir plus de détails sur ces deux courants d'analyse du travail humain. En plus de ces deux courants, nous nous sommes aussi appuyé sur la cognition distribuée pour comprendre comment l'information se propage dans les situations de travail d'inspection. Autrement dit, il s'agit de comprendre comment les inspecteurs étendent leur cognition dans l'environnement, au travers d'autres personnes et d'artefacts (cognitifs ou non) [341]. Ce cadre peut révéler le caractère décentralisé et multi-acteurs du processus décisionnel, les besoins informationnels des inspecteurs et des autres acteurs, éloignés physiquement ou non, du département d'inspection. Enfin, les méthodes issues de l'ingénierie des connaissances servent à définir les méthodes de collecte de données à favoriser selon le type de connaissances à capturer (procédurales, conceptuelles / explicites, tacites) et le grain d'analyse recherché (Figure 4.4) [228].

Ainsi, ce cadre méthodologique incorporant la macrocognition, l'approche systémique des situations de travail, la cognition distribuée et l'ingénierie des connaissances nous permet respectivement :

- D'analyser les stratégies des inspecteurs pour remplir leurs objectifs, leur processus décisionnel, les connaissances auxquelles ils font appel, les critères qu'ils doivent prendre en compte pour mener à bien leur inspection
- De comprendre les déterminants et contraintes écologiques qui régissent l'activité de travail des inspecteurs dans le contexte organisationnel
- D'identifier comment l'information (input/output) se propage dans le système de travail : acteurs et artefacts cognitifs (technologies)

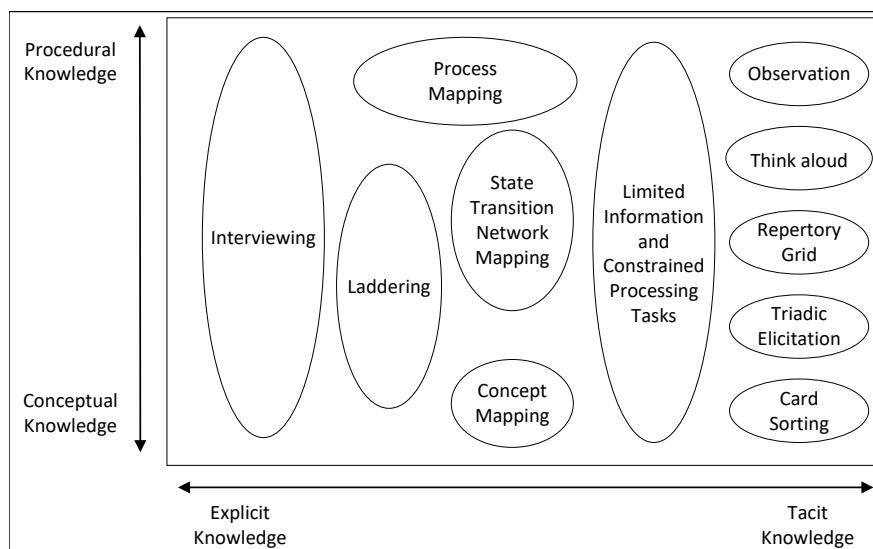


FIGURE 4.4 Comparatif des méthodes d'éllicitation des connaissances selon le type de données souhaitées. Tiré de [21]

- De varier les méthodes de recueil de données pour obtenir un ensemble de connaissances explicites, tacites, procédurales, conceptuelles ; et trianguler les méthodes de collecte de données

4.4.3 Collecte et interprétation des données

Plusieurs sources et méthodes de collectes de données ont été utilisées pour analyser en profondeur le contexte organisationnel, l'activité d'inspection et le contexte du projet. Le tableau 4.2 reprend les fondements méthodologiques de cette phase. Au total, la collecte de données pour la Phase 1 a totalisé plus de 115 heures de collecte de données sur le terrain² et plus de 300 heures d'analyse et d'interprétation des données. Il a été possible d'estimer ces chiffres grâce à l'enregistrement de chaque activité de collecte de données dans un journal de bord tenu sur *Microsoft Access* ©. À noter que de plus amples informations sur les procédures méthodologiques se trouveront dans les chapitres 5 et 6.

La multitude des méthodes de collectes de données a rempli plusieurs objectifs. Premièrement, afin d'assurer rigueur et validité interne à nos analyses qualitatives, nous avons triangulé nos méthodes et source de collecte de données (Tableau 4.2) [342]. Deuxièmement, la collecte et l'interprétation des données ont été réalisées simultanément [342]. Il nous a été possible de vérifier et mettre à jour l'exactitude de nos données tout au long de notre recherche ter-

2. Ce total exclut la partie la plus longue, soit celle de la recherche documentaire interne où les procédures standards, aides à la tâche et rapports techniques ont été scrutés

TABLEAU 4.2 Fondements méthodologiques pour la Phase 1

Focus	Contexte d'utilisation	Projet SARA
Lieu de collecte de données	- Site industriel - Échanges courriels	- Bureaux corporatifs - Visioconférence
Participants	- Inspecteurs (n = 11) - Opérateurs (n = 4) - Cadres : ingénieur(e)s et gestionnaires (n = 7)	- Ingénieur(e)s (n = 6) - Chercheur(e)s (n = 3)
Échantillonnage	Par convenance [342]	Par convenance [342]
Méthodes de collecte de données	- Observations : participantes et non-participantes (N = 25 ; min = 2475) - Entrevues : semi-structurées et rétrospectives [16] (N = 36 ; min = 1370) - Focus group (N = 1 ; min = 30) - <i>Concept mapping</i> (N = 3, min = 240) [220] - Questionnaire (N = 3, min = 95) - Semi-expérimentation (N = 6, min = 660) - Enregistrements audio et vidéo - Analyse documentaire - Étude exploratoire (environ 1200 min)	- Entrevues (N = 4, min = 185) - Focus group (N = 5, min = 345) - Analyse documentaire
Analyse et interprétation des données	- Prétraitement des données (enregistrements audio et vidéo) et retranscription - Codage thématique (diagramme d'affinité) - Analyse de contenu et croisement des données - Modélisation empirique (tâches et activité) - Vérifications auprès des opérateurs - Itérations si nécessaire	- Retranscription des données brutes - Analyse de contenu - Codage thématique - Description - Interprétation des descriptions

rain, et ce jusqu'à ce que nos données soient saturées [342]. Les phases d'interprétation des données ont mis en évidence des phénomènes macrocognitifs complexes dans l'activité de travail des inspecteurs qui engendraient des collectes de données additionnelles. De nombreuses itérations entre collectes et analyse de données ont ainsi été réalisées. Troisièmement, une des composantes de notre cadre méthodologique pour l'analyse du travail humain repose sur "l'analyse systémique des situations de travail" [16]. Elle vise notamment à analyser l'activité réelle de travail des experts en situation pour faire ressortir les décalages entre le travail prescrit (ce qu'on demande aux personnes de faire) et le travail réel (ce que font réellement les gens). Pour mettre en évidence cette distinction, il a fallu combiner recherches documentaires internes (travail prescrit) et observations aux postes de travail (travail réel) [338]. Cette triangulation méthodologique a permis d'identifier et documenter les régulations mises en oeuvre par les travailleurs pour répondre aux exigences opérationnelles. À noter que ces observations ont été réalisées en contexte réel (pièces de production) et artificiel (pièces re-

tirées de la production pour cause de non-conformité)³. Le contexte artificiel correspond à la mise en place d'un protocole semi-expérimental visant à creuser les critères guidant le processus décisionnel sur un défaut relevé et leur ordre d'arrivée. Cela ne correspond pas à une analyse systémique des situations de travail étant donné que l'environnement naturel est légèrement modifié pour accommoder cette analyse (p. ex. pas de contraintes temporelles). Enfin, la sélection des inspecteurs-participants a aussi été motivée par la volonté de couvrir diverses formes d'expertise. Les onze inspecteurs rencontrés possédaient une expérience de travail comprise entre 2 et 15 ans.

4.5 Phase 2 - Design et Implémentation : Processus de médiation digitale des analyses descriptives en objets de conception centrés sur le dispositif technologique

4.5.1 Objet d'étude

La Phase 1 nous a permis de dresser un portrait complet du contexte organisationnel où la technologie allait être déployée, de l'activité d'inspection, ainsi que des enjeux, objectifs et jalons du projet SARA. Malgré tout, les données obtenues étaient plutôt descriptives. Dès lors, leur utilisation pour la conception du futur système de travail est limitée, de même que les orientations qu'elles fournissent [165,343]. La Phase 2 marque le début de processus de médiation digitale, soit, la transformation des données descriptives issues du "monde physique" en artefacts de conception qui soutient le développement technologique [20]. Rappelons que les écueils d'implantation des technologies en milieu industriel surviennent souvent par un décalage entre les fonctionnalités techniques et les caractéristiques du contexte organisationnel (exigences opérationnelles, règles métier) [13,20], incluant les utilisateurs finaux (besoins, tâches à réaliser, limites et attentes) [344]. Ainsi, l'objectif est d'identifier et co-transformer les connaissances pertinentes du contexte organisationnel dans un format actionnable d'un point de vue développement produit. Le tout en s'assurant que les objets de conception transformés capturent bien l'essence du phénomène modélisé et restent fidèles aux études initiales [233]. De cette manière, il est possible d'intégrer la sémantique du domaine (p. ex. règles institutionnelles) dans les programmes informatiques [345] pour assurer la validité écologique [69] et la fiabilité des résultats fournis par le système automatisé [37]. En outre, cette phase a permis (1) d'organiser et transformer les connaissances descriptives en objets de conception formatifs qui soutiennent les lots de travail des concepteurs et des scientifiques du projet SARA ; (2) recueillir et analyser des données supplémentaires pour mieux comprendre

3. Plus de détails sont donnés dans la partie méthodologique du premier article présenté à la Section 5

Les résultats des Phases 1 et 2 sont présentés au chapitre 5 (article 1) :

- Cabour, G., Ledoux, É., & Bassetto, S. (2022). Aligning work analysis and modeling with the engineering goals of a Cyber-Physical-Social System for industrial inspection. *Applied Ergonomics*, 102, 103703. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103703>

4.6 Phase 3 - Design et Implémentation : Processus de médiation digitale des données issues de l'analyse de l'existant en objets de conception centrés sur les situations de travail futures

4.6.1 Objet d'étude

Après avoir portée une attention spécifique sur les objets conception qui soutiennent le développement de certains modules technologiques, la Phase 3 s'intéresse aux méthodes, outils et objets de conception qui soutiennent et permettent une (re)configuration écologique des futures situations de travail (incluant la collaboration HT). Ce développement méthodologique et pratique vise à articuler précautionneusement les caractéristiques importantes de la situation de travail actuelle (p. ex. tâches à réaliser, exigences opérationnelles, connaissances tacites et règles métier) avec les capacités technologiques de SARA et les besoins futurs des opérateurs pour concevoir les futures situations de travail. En outre, pour (1) s'assurer que toutes les fonctions de travail soient couvertes par le système automatisé, les opérateurs ou les deux entités ; et (2) que cette décomposition du travail soit réintégrée dans un tout commun. Ces deux éléments cruciaux sont soulignés par *Miller et Feigh* [13, p.2] : "The degree to which a work domain rooted in decades of institutional experience can incorporate vastly improved functionality that modern technologies may provide is limited". Cet aspect est d'autant plus important puisque les ambitions initiales du projet SARA étaient d'automatiser complètement le processus actuel d'inspection (Voir 4.2). Ainsi, les travaux réalisés dans cette phase reposent sur une médiation technologique-opérationnelle, sous la forme d'objets de conception formatifs, qui contextualisent la manière dont le travail d'inspection pourrait être réalisé en équipe HT, compte tenu des contraintes du domaine, des exigences opérationnelles et des capacités technologiques de SARA. Peu de méthodes existent pour naviguer à travers ce "golfe de conception" [13] et nos objectifs pour cette phase se résument ainsi :

- Objectif 1 : formaliser un portrait fonctionnel et intelligible de la situation de travail existante et des capacités/limitations technologiques sur laquelle l'équipe de conception multidisciplinaire peut se reposer pour anticiper et évaluer certaines caractéristiques de la future situation.
 - Livrable 1.1 : création du construit et de la méthode de "couverture technologique"

qui mesure le pourcentage selon lequel la technologie peut réaliser une fonction de travail partiellement ou complètement.

- Objectif 2 : concevoir le cadre de réalisation du travail futur sous la forme de scénarios d’usages en allouant les tâches à SARA et aux opérateurs humains et en réalisant une analyse d’interdépendance. Souligner les limitations technologiques et les améliorations futures à prioriser (développement technologique ou design organisationnel) pour implémenter le système à la production
 - Livrable 2.1 : amélioration méthodologique et pratique de l’analyse d’interdépendance et application au processus d’inspection
 - Livrable 2.2 : identification des points bloquants nécessitant des activités de conception supplémentaire pour intégrer le système à la production

4.6.2 Médiation et interprétation des données

Les étapes de médiation et d’interprétation des données pour la Phase 3 se sont déroulées comme suit :

- Transformation et traduction des analyses descriptives du travail en spécifications fonctionnelles
- Animation de quatre *focus group* exploratoires [347] pour déterminer la faisabilité technique de SARA pour réaliser chacune des fonctions. Quantification du taux de couverture technologique (partiel, complet, non applicable, non faisable) et de la nature des fonctions (humaine, machine, hybride)
- Comparaison entre le processus manuel et automatisé et détermination des écarts potentiels
- Analyse d’interdépendance et identification de huit cas critiques (*design flaws* ou *edge cases*)
- Conduite d’un *focus group* confirmatoire [347] pour déterminer les actions de conception (développement technologique, design organisationnel ou formation) à mettre en place pour adresser les 8 cas critiques

Les résultats de la Phase 3 sont présentés au chapitre 6 (article 2) :

- Cabour, G., Ledoux, É., & Bassetto, S. (1ère ronde de révision). Transitioning from a Technology-Driven to a Work-Driven Development Cycle : an Action Design Research in Industrial Inspection. *Journal of Production Research*.

4.7 Phase 4 - Design : Cadre de conception pour aligner recherche utilisateur et développement de l'IA explicable

4.7.1 Objet d'étude

La Phase 4 prend une direction différente des trois précédentes qui étaient exclusivement de nature inductive et suivaient les jalons du projet SARA. Il s'agit ici de concevoir un cadre de conception "axé sur le travail" en reliant le développement technique de systèmes à base d'intelligence artificielle (IA) avec le futur contexte d'utilisation. Nous avons choisi comme objet d'étude l'explicabilité des systèmes à base d'IA pour trois raisons :

1. Alignement avec l'I5.0 : l'IA est une technologie phare de l'I4.0 [30]. Malgré tout, son implantation dans des milieux réels de travail se heurte à des problèmes opérationnels et éthiques, en partie causée par l'opacité des raisonnements et décisions prises par l'IA [71, 201]. L'interprétabilité des boîtes noires de l'IA est caractérisé comme enjeu d'interaction humain-machine puisque le contenu à expliquer/interpréter dépend des besoins de la situation (tâches à réaliser, informations à percevoir, caractéristiques et besoins des utilisateurs, nature critique du domaine d'application, régulations en vigueur) [220]. C'est donc un cas d'étude intéressant pour ce travail de recherche qui s'inscrit dans les approches de conception anthropocentrées de la DA (I5.0)
2. Recherche partenariale-collaborative : la recherche partenariale-collaborative donne lieu à des actions de collaboration et de croisement des savoirs entre divers acteurs pour produire des nouvelles connaissances sur un phénomène. Dans le contexte du projet SARA, une équipe de recherche académique du projet SARA travaille sur la thématique de l'IA sécuritaire (*Safe AI*), dans laquelle l'interprétabilité des résultats de l'IA est une sous-catégorie. C'était donc une opportunité de recherche interdisciplinaire intéressante pour combiner leur expertise en intelligence artificielle avec la nôtre en facteurs humains pour co-construire de nouvelles connaissances sur la conception centrée utilisateur des systèmes à base d'IA.
3. Fossé dans la littérature : la littérature souligne la nécessité de prendre en compte les facteurs techniques et humains pour concevoir de l'IA efficace et utile pour le contexte d'usage [51, 70, 220]. Cependant, les disciplines qui se penchent sur ces aspects évoluent souvent en silo la où un arrimage permettrait d'atteindre les objectifs d'utilisabilité, d'efficacité et d'utilité énoncés [52]. Les équipes de conception interdisciplinaires qui évoluent dans ces sphères techniques se heurtent à des problèmes de collaboration provenant de différents facteurs comme la littératie numérique [348], les divergences culturelles et méthodologiques [165], les injonctions paradoxales [349] et de mise en

dialogue social-technologique⁴.

Cette Phase 4, et le cadre de conception qui en découle visent à combler cet écart en outillant les espaces de conception interdisciplinaires dans leur prise en compte systématique des facteurs humains dans les projets de développement d’XAI, notamment en proposant une approche axée sur l’utilisateur et ses besoins situationnels. L’application du cadre de conception est illustrée avec le projet SARA.

4.7.2 Construction du cadre de conception

Nous nous sommes inspirés de la méthode de développement de taxonomies proposée par *Nickerson et coll.* [350] pour concevoir notre cadre de conception reliant situations d’usage futures et développement algorithmique de l’IA explicable. *Nickerson et coll* [350] proposent de naviguer entre des phases de construction empiriques et conceptuelles pour développer et raffiner les constituants d’une taxonomie. Notre phase conceptuelle a consisté à identifier et déterminer les méta-caractéristiques de notre cadre de conception via une revue initiale de la littérature. Nous avons ciblé uniquement les articles qui s’intéressaient simultanément à la conception *centrée utilisateur* et l’interprétabilité des systèmes à base d’IA pour extraire les caractéristiques clés. Cette première ébauche a ensuite été complétée par une phase empirique où nous avons utilisé des données secondaires provenant du projet SARA (Phases 1 et 2) pour remplir et utiliser le cadre de conception. De cette phase de confrontation empirique, le cadre a été peaufiné en ajoutant, modifiant ou supprimant des catégories. L’étape ultime s’est traduit par une conceptualisation déductive [350] où les modifications empiriques réalisées ont été transposées dans un cadre généralisé : l’Abstracted Explanation Space. Enfin dernière étape et pas des moindres, des réviseurs anonymes ont proposé quelques ajustements que nous avons réalisés lorsque que l’article présentant le cadre de conception a été soumis dans une revue avec un comité de lecture.

Au niveau des contributions de cette phase, Garrick Cabour a contribué à la construction de la première ébauche du cadre de conception et fournit les données empiriques. Andrés Morales, de l’équipe *Safe AI* de Polytechnique Montréal, a contribué aux phases de raffinement du cadre de conception, notamment dans les dimensions techniques touchant à l’ingénierie des systèmes XAI. Les résultats de la Phase 4 sont présentés au chapitre 7 (article 3) :

- Cabour, G., Morales, A., Ledoux, É., & Bassetto, S. (2022). An explanation space to align user studies with the technical development of Explainable AI. *AI & Society*. <https://doi.org/10.1007/s00146-022-01536-6>

4. <https://www.anact.fr/file/11098/download?token=WjQxVUbL>

CHAPITRE 5 ARTICLE 1 : ALIGNING WORK ANALYSIS AND MODELLING WITH THE ENGINEERING GOALS OF A CYBER-PHYSICAL-SOCIAL SYSTEM FOR INDUSTRIAL INSPECTION

Cet article a été publié dans le journal *Applied Ergonomics* en date du 6 mars 2022. 102 :103703. doi : 10.1016/ j.apergo.2022.103703.

Cabour, G. (Polytechnique Montréal), Ledoux, É. (UQAM), Bassetto, S. (Polytechnique Montréal).

Abstract

Human inspectors rely on a significant number of macrocognitive functions, processes, and tacit knowledge to diagnose the condition of aircraft engine components. A deep understanding of inspectors' cognition and actions *in the wild* may establish the requirements to develop intelligent automation that truly enhances their perceptual, cognitive and social abilities. This paper takes a two-pronged approach to uncover and model the complexity of industrial inspection in a manner that aligns with the technical development stages of a Cyber-Physical-Social System. The findings offer thick descriptions accompanied by four descriptive empirical models that depict inspectors' meaning-making and decision-making processes. It includes how they gather, process, and apply domain-specific knowledge to diagnose a component's condition and how they deal with domain-related factors (norms, institution's rules, standard operating procedures). This study also highlights the support provided by empirical data/models in designers' work packages. It concludes by presenting the design implications of these findings to envision future human-automation work situations.

Keywords - Visual inspection ; Cyber-Physical System ; Work analysis

5.1 Introduction

In the aerospace domain, aftermarket services for engine components (maintenance, repair, and overhaul – MRO) account for more than 50% of aircraft manufacturers' revenues [351–354]. Aftermarket servicing centers on the expertise of trained operators, cutting-edge technologies, and highly standardized processes [355]. At the core of MRO, industrial inspection is a manual, knowledge-intensive job in which inspectors examine aircraft parts to ensure they are free of harmful defects [8,317]. Given ever-increasing customer requirements and the progress of machine vision, this human-specific task has been the focus of significant

automation intentions in the past three decades [8, 319, 353]. In a cross-disciplinary project, we intend to design and implement a first-of-a-kind Cyber-Physical-Social System (CPSS) for industrial inspection. CPSS combines human and autonomous agents in a joint activity to produce better outcomes than either of the two could produce separately [47, 356, 357]. Since the rate of human error in visual inspection ranges from 20% to 30%, new-generation sensors can enhance humans' perceptual capabilities to make more informed decisions in automation-assisted inspection scenarios [8, 109]. However, it presents many challenges due to the information rich nature of industrial inspection and the highly regulated nature of the aerospace domain.

Aerospace industrial inspection is characterized by a vast problem space where operational requirements and institutional rules generate complex decision flows [6, 8, 263]. Standard Operating Procedures (SOPs) issue quality norms, types of surface anomalies expected (defects), and acceptance/rejection criteria [312]. Inspection can be summarized as follows. Trained operators examine aircraft parts for surface defects (*visual search*) and decide on their condition (*decision*): acceptable, repairable, unacceptable [8, 308, 313]. Diagnosing the condition of a part uses high-level cognitive functions to gather and process relevant information from the problem space [109, 358]. The overall success of the process depends heavily on inspectors' expertise, to the extent that the knowledge deployed is up to 50% tacit (know-how) [i.e., it does not appear in SOPs] [6]. This knowledge is stocked in experts' heads and contains "contextual information about how to best detect [characterize] and diagnose product defects" [6, p.1]. Erroneous decisions can lead to human fatalities and loss of costly components [319]. Therefore, it is crucial to uncover how inspectors tacitly contribute to operational performance (individually and collectively) and compensate for the limitations of inspection aids before automating the process.

Since this is a highly regulated sector, the analysis must systemically depict how inspectors' activity is constrained by regulatory and socio-organizational factors [16, 231]. The automated system will perform some information-processing and decision-making operations that human operators previously performed [47, 359]. Therefore, it must consider the domain constraints and the institution's rules to produce reliable results. A recent review of automated visual inspection has shown that automated systems perform well in the *visual search* phase [109]. However, none of the systems examined supports the *decision* phase. Similarly, few studies have attempted to describe inspectors' cognition when diagnosing part condition in a realistic operational context [6, 323]. During this step, inspectors *process and make sense of data* from multiple sources to generate correct outcomes [109, p.61]. Because these elements are context-dependent, the domain-specific knowledge required for this task and the *domain-related factors* that constrain how decisions are made must be carefully identi-

fied and represented to the design team so that this information can be used to design the system [57, 231].

Reusing operational knowledge is key for defining the design space of future intelligent systems, whether fully or partially automated [6, 13, 133, 360]. Fieldwork researchers (e.g., human factors specialists) experience difficulty integrating their data in engineering design [165, 343]. Data conveyed to designers are often misaligned with design objectives in terms of content or formalism [235, 361]. For this knowledge to be reused in design – and go beyond mere recommendations – it must be represented in a way that meshes with design goals and engineering needs.

This paper seeks to describe and visually represent the hidden complexity of industrial aerospace inspection (Work-As-Done) to support the design of a CPSS. This visual representation takes the form of descriptive empirical models. Models abstract system complexity and promote communication between stakeholders and mutual learning [362]. They enable the integration of expert knowledge into computer programs [73]. A rigorous methodology for data analysis and translation is essential, but few papers explain in detail how to proceed [361]. Thereby, we model the operational knowledge acquired with a twofold objective. First, we want to make visible the semantics of the problem space that inspectors deal with [15, 225, 226, 345]. That is, describing thoroughly the sequence and interrelated factors that modulate their decision flow : information-intake mechanisms, meaning-making process, domain-specific knowledge (explicit and tacit), decision criteria, domain constraints, rules, protocols, and other actors involved. Second, the operational knowledge elicited must be seamlessly aligned with the technological development milestones in a format designers can use, i.e., how empirical findings can be articulated in a form suitable for designers [164]. Empirical results are seldom provided to designers with a reflection on what would be of interest for them, i.e., why these empirical data would be valuable in their work packages [66, 164, 235]. We believe that this is the first work that addresses the two gaps highlighted above. Ultimately, this knowledge will provide guidance to make more informed design decisions and reconfigure a human-autonomous work system. The research questions below drive our efforts :

1. How do inspectors individually and collectively diagnose the condition of service-run components in the aircraft maintenance domain ?
2. How can we abstract operational knowledge and align it with the technological development pursued ?

5.2 Methods

5.2.1 Research Context (SARA Project)

The empirical basis of this paper originates from a project that aims to design and implement a first-of-a-kind CPSS in the Aircraft MRO domain. The facility operates in-service aircraft engines, and the workflow can be simplified as follows : on arrival at the factory, aircraft engines are first disassembled, and then each component goes through a robust inspection process to certify that it is free of defects. If not, damaged components are either repaired or replaced. The CPSS, called SARA,¹ is expected to assist human operators to inspect service-run components, sentence² and remove harmful defects. The project involves a consortium of academics, R&D institutes, and industrial partners that aims to automate the sentencing of complex service-run components in the aerospace sector. One design team is responsible for (1) developing the system hardware, software, and user interface; and (2) integrating subsystem components from other design stakeholders (Design Team #2). Another team is responsible for computer vision and 3D surface defect characterization (Design Team #3). Because the system will generate many data, one design team needs to understand the data requirements for the institution's stakeholders (Design Team #1). Finally, the project client (the industrial institution) will provide the system requirements and support the design teams' technology development. Three components out of a thousand are candidates for the project (turbine disks, high-pressure turbine shafts, and fan blades). Part of the challenge is to automate the data from the inspection into machine-readable criteria for sentencing [352]. Indeed, inspectors rely on rich mental models when facing unforeseen situations, but machines require programming specific to each situation [352]. The research was approved by the Research Committees of the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and Mitacs. In addition, prior to each data collection activity, participants were asked to consent to be observed, interviewed, and recorded, and also asked whether the data could be used later for design or publication.

5.2.2 Research Design

To address the research questions and capture how work is currently done and the associated challenges, we performed a 16-month in-depth field study. Our theoretical framework is grounded within the *Ergonomic Work Analysis* (EWA) [16] and *Knowledge Engineering* (KE) [228] approaches. We used EWA to approach work situations systemically and focus

1. *Système d'Analyse et de Réparation Automatisée* (Automated Visual Inspection, Sentencing & Dressing).

2. Sentencing : deciding on the state of defects.

on human work's physical, mental and social aspects. The framework distinguishes between how work is imagined and described in procedures (Work-As-Imagined or WAI) and how this work is carried out in practice (Work-As-Done or WAD). This distinction sheds light on operators' tacit knowledge and strategies to compensate for procedures' limitations and generate correct outcomes. The approach also enables a *macroergonomics* perspective to understand how *domain-driven factors* (called determinants) constrain, enable and shape work execution and performance [16]. As Ergonomics & Human Factors (E&HF) specialists report struggling to integrate their findings in the system design cycle, we also examined the project designers' milestones, goals, and timelines [234,247]. This step is crucial to define a data integration plan and provide designers with actionable data to handle their work packages [247]. We hypothesize that the combination of EWA and KE techniques, and the study of project designers will allow us to represent valuable operational knowledge that aligns with technical development processes.

5.2.3 Data Collection

The EWA framework guided our data collection methodology – that is, understanding WAI first and WAD second – and is divided into three steps :

1. We conducted an internal documentation review to understand how the work is imagined within the company. Simultaneously, we examined the available knowledge on *visual inspection* in scientific databases.
2. We conducted qualitative fieldwork using various data collection methods to understand how work is currently done in the socio-technical system (Work-As-Done).
3. We studied the "goals, approaches, and timelines of design stakeholders to identify where and how value can be added through ergonomics analysis" [247, p.231].

Internal Documentation Analysis (Work-As-Imagined – WAI)

Aircraft MRO is a standardized work environment where procedures ensure that components respect safety policies. These documents contain all the instructions (steps, requirements, 3D drawings of the parts), explicit knowledge (dimensions, tolerances, limits), and resources needed (magnification system, directional lightning) to complete an inspection/sentencing task. We reviewed the inspection aids and SOPs that inspectors use to inspect and sentence aircraft. The SOPs were written hierarchically, using a structure of tasks, sub-tasks, and additional information to be consulted, which facilitated the document analysis. This review provided us with a basic understanding of the inspectors' work requirements before conducting field studies. It also supported the construction of empirical models.

Fieldwork Inquiries (Work-As-Done – WAD)

Because inspecting and diagnosing part conditions is situated socio-cognitive work, we conducted an Ergonomic Work Analysis [16]. We varied our data collection methods to thoroughly understand inspectors' problem space and elicit different types of knowledge (either procedural, conceptual, explicit, or tacit) [21]. Our research sample consisted of 12 inspectors with experience ranging from less than one year to more than 15 years. We conducted 11 on-site observations (with concurrent verbalization or question answering), 26 mixed-method interviews and 6 field experiments totaling 43 hours of data collection. Observations and field experiments were conducted only for two in-service aircraft components. The procedures are described in the following paragraphs.

Before observing the inspectors' work, we conducted individual semi-structured interviews with 10 inspectors to gain a comprehensive perspective of the operational challenges, roles, and work requirements. It was also the first contact for the social construction of our research [16]. We then conducted participant observations ($n=4$; $N=3$) to understand how the entire inspection process unfolds, from work-piece collection to the stamping of administrative paperwork. We "shadowed" inspectors without interrupting them to gain insights into the "observable" part of work from an ecological perspective (communication, physical operating methods, direction of gaze).

Following our observations, debrief interviews were carried out immediately to deepen the analysis and ask questions about the content observed. After reviewing our fieldwork notes, we also conducted self-confrontation interviews to gain insights into inspectors' cognitive activity (contextual knowledge, reasoning, etc.). These interviews, supported by fieldwork data (textual, audio, or video contents), allow a "scaffolding" construction of inspectors' mental models by allowing them to comment on specific points of their activity [228, 232]. In order to delve deeper into the cognitive sphere of inspectors' work, we then executed think-aloud protocols on realistic ($n=7$; $N=5$) and experimental situations ($n=6$; $N=4$). Inspectors were asked to verbalize their thoughts and actions while performing inspection and sentencing tasks. Simultaneously, we asked several questions during task performance or after completion (e.g., "What criteria/constraints led you to consider that option, or reject other options?").

Experimental situations correspond to inspecting a sample part where the defects and associated decisions are recorded and known beforehand. Factory engineers asked two experienced inspectors to map five aircraft components (4 Fan Blades and 1 High-Pressure Turbine [HPT] Shaft). Mapping a component involves recording each detected defect with its relative metrics (dimensions in length, width, and depth) and outcomes (accepted, repairable, unaccepted).

Then, we asked three experienced inspectors to inspect each of the samples while thinking aloud. Decision outcomes, variables, and defect metrics were known beforehand, allowing for richer concurrent verbalization with inspectors throughout the process.

Designers' Work Packages

In order to provide actionable operational knowledge for designers, we first determined the steps that each designer engaged in. We reviewed the SARA research proposal and project follow-up charts to identify key designers and their time-scaled milestones. Based on the inspection knowledge acquired (WAD), we identified what data would add value to their milestones and when they would need them (timing criteria). This guided us in determining the subsequent units of analysis for fieldwork inquiries, as we focused on specific samples of inspector activity (e.g., sense-making and decision-making phases). Four semi-structured interviews were conducted to elicit designers' needs in terms of data/input : three with the teams that develop the system's hardware and software, and one with the team responsible for (3D) defect characterization. Finally, two additional semi-structured interviews were required to pinpoint how to present and transfer fieldwork data in a format designers could exploit.

5.2.4 Data Analysis

The data analysis process was carried out simultaneously with data collection over 16 months. It followed an iterative path to ensure a systemic understanding of industrial inspection (WAI and WAD) and design needs (designers' work packages). Data analysis was undertaken in five steps, as follows :

1. Each interview was recorded, transcribed and analyzed multiple times using QSR NVivo 12. We iterated and confirmed complex aspects with the inspectors and/or designers if necessary.
2. During the observations, think-aloud protocols, or experiments, we recorded and segmented in real time the fieldwork data collected in a manual Event Log. Each Event Log was then computerized and analyzed to assign a goal, a task and the underlying cognitive activity to each Event.
3. Then, we organized and analyzed our data in a *Work Activity Affinity Diagram* following the method proposed by Hartson et al. (2012). This step corresponds to a categorical aggregation that clusters the fieldwork data into different categories/themes to *shed light on users' activity and their environment* [363]. We coded the relevant concepts of the semantics of inspectors' problem space, whether macro (actors involved, communication,

gap between WAI and WAD, domain constraints) or micro (perceptual cues, decision criteria, reasoning, information-taking mechanisms, strategies, tacit knowledge).

4. Fuzzy points or multifaceted concepts/themes required a confirmation loop that triggered the need for additional *in-situ* data collection and analysis.
5. We finally completed the description and validation of the data incrementally, using semi-structured interviews with stakeholders and data triangulation.

5.2.5 Data Representation : Empirical Modeling

After our data collection and analysis phases were completed, we started constructing the empirical models. We used a model-based approach combined with thick descriptions to represent our empirical results and disaggregate the relevant WAD components for the CPSS design. For this paper, models or modeling refer to the act of decomposing and revealing the complexity of inspection-as-done. Each model focus on making visible parts of the problem space and hidden complexity of inspection, specifically decision-making tasks (as the CPSS is expected to automate them partially). We derived the fieldwork data into empirical models. We co-developed modeling formalisms with designers based on integration requirements and relevant domain-specific knowledge for the system. The collection and modeling of fieldwork data are interrelated : questions raised by designers, unclear operational knowledge, or validation of empirical models with Subject Matter Experts (SMEs) generated multiple iterations of data collection and modeling. This iterative process allowed us to model the fieldwork data in a way that is meaningful and consistent with engineering goals. Empirical models also endorse a boundary object function in formal and informal discussions with designers to generate more profound design knowledge (e.g., system capabilities and requirements) [7]. In addition, in two formal semi-structured interviews with Design Teams #1 and #3, we asked them specifically how they used the empirical models and how they contributed to their work packages. The interviews lasted approximately 30 minutes. They were recorded, transcribed and analyzed using QSR Nvivo 12 to extract data on model usage.

5.3 Empirical Findings

In this section, we first present the overall inspection activity through the general task process (workflow). We then situate the needs of designers within the context of the inspection workflow. Next, the empirical models developed with fieldwork data are presented. Each subsection corresponds to a specific model. They are depicted with the following points : structure of the models, objectives, and exhibited knowledge on industrial inspection. A final

subsection aligns the empirical models with the primary conceptualization of SARA and presents several design assumptions.

5.3.1 Industrial Inspection (Sentencing) : WAI and WAD

In this section, we present how an inspection of one part is actually done. First, we detail all the steps that are carried out to inspect and diagnose the part's condition. Then we show, in Table 5.1, the discrepancies between work as imagined in operating procedures (SOPs and inspection aids) by manufacturing engineers and how is it done in real-world situations by inspectors.

Inspecting and sentencing a part involves the combined use of perceptual senses (visual, tactile, and perceptual-motor), resources (human, tools, documentation), and cognitive functions (sense-making, decision-making). This activity can be broken down into five stages (Figure 5.1). First, inspectors bring the part(s) to the workstation and collect appropriate inspection aids (work instructions, documentation, tools) to start the sentencing (Figure 5.1 – I. Work Preparation).

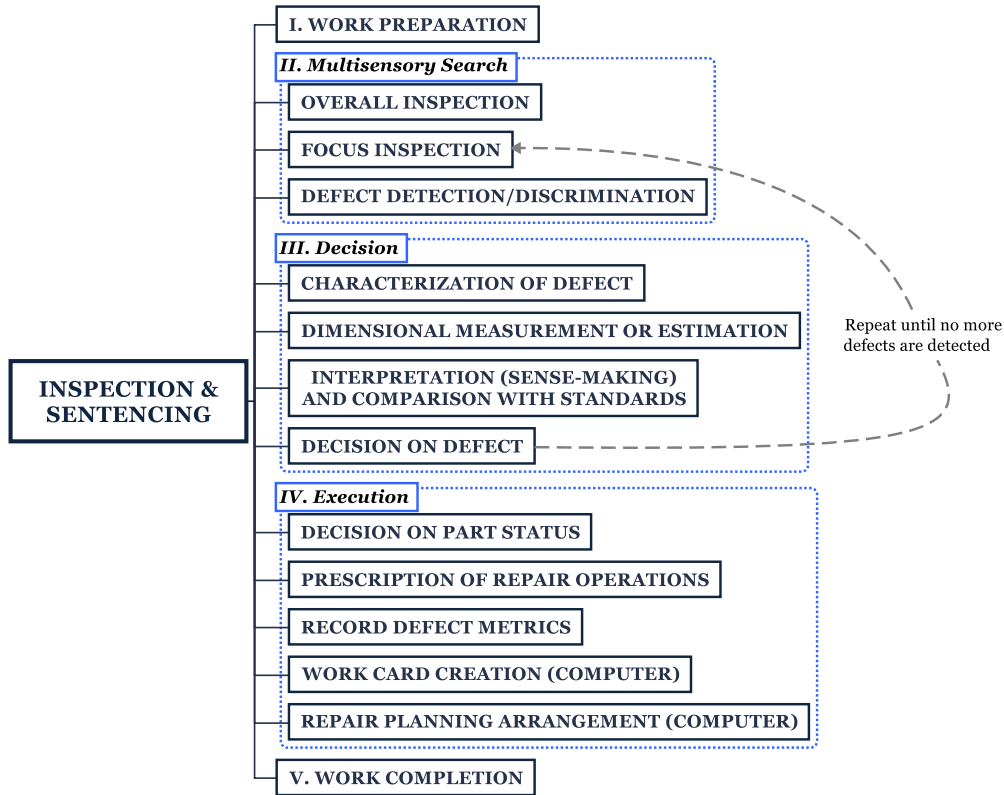


FIGURE 5.1 Overall sequence of industrial inspection (sentencing)

Next, they visually inspect the overall appearance of the part to reject any obvious detrimental conditions and then perform a multisensory analysis on each area until they detect any damage. During this task, they also verify whether previous repair operations were applied, as they may limit further repair scheme applications, e.g., check usual repaired areas for polishing marks (Figure 5.1 - II. Multisensory Search). Thirdly, they enter into a complex decision-making loop to diagnose the condition of the defect/part. They characterize the defect attributes to classify it (Figure 5.1 - III. Decision). They then measure or estimate the depth of the defect and compare it to the tolerance threshold specified in the standards. Next, they diagnose whether the defect is acceptable (as is), repairable or unacceptable, leading to part rejection. To do this, they process (sense-making) all the decision variables, interpret the validity of previous measures/estimations, and eventually confirm their choice with their peers (inspectors, polishers, engineers). The remaining tasks require taking the necessary actions following diagnosis (Figure 5.1 - IV. Execution) : deciding about the part's overall condition (serviceable or unserviceable), prescribing and planning the sequence of repair operations (polishing, machining) and carrying out computerized procedures. Their work is completed when the appropriate information is transmitted to production management stakeholders, and the part (or set of parts) is stored in the corresponding racks (Figure 5.1 - V. Work Completion). Note that this description is a simplified version of the inspection. Table 5.1 lists the deviations and compensations that inspectors systematically make while performing this work. Depending on the part being inspected and the needs of the situation, they will perform some or all of these additional operations to meet work requirements (quality, cycle time, domain rules). In addition, a complete decomposition of the tasks, sub-tasks, and decision cues to assess the completeness of work requirements (*control check*) can be found in Appendix A.

Tableau 5.1: List of observed deviations between WAI and WAD. Only the tasks where deviations were noticed appear in this table. See Appendix A for a full list of tasks and sub-tasks

Work-As-Imagined in SOPs and inspection aids	Work-As-Done (these elements are the systematic adaptations that inspectors make to meet operational requirements and work demands)
I. Work preparation	
- Collect the relevant information for the part concerned	- Determine the information/data that is relevant for the case in question
- Check previous repair operations carried out	- Ensure the correspondence between the computerized information and that present on the component
	- Determine the appropriate version of SOPs to be used
	- Ensure that flight times of life-limited parts are within the airworthiness cycle
II. Multisensory Search	
- Visually examine the part for defects	- Clean the parts with a rag if dust or dirt is present
III. Diagnosis	
- Classify the type of defect	- Determine whether the defect is classifiable and labeled in SOPs or Local Operating Procedures (LOPs)
	- Causal reasoning to classify the type of defect based on general knowledge of the engine and the area of defect occurrence
	- Evaluate whether the defect has the potential to degrade over time and be hazardous to aviation safety
	- Determine if the defect was found in flight or during a shop visit to possibly point out internal process deficiencies
	- Skip the defect classification if it is not relevant for the case at hand (e.g., same tolerance limits for all defects in the area of occurrence)
- Identify the area of defect occurrence	- If the defect is located between two areas, evaluate the defect for each area
	- Determine if defects occur in registered areas, in a critical area, or in an area that was polished during a previous shop visit, as this changes the possible course of action
- Measures defect	- Measure the same defect multiple times when it is difficult to take measurements and average the different measurements
	- Determine if the tool (e.g., depth gauge) has reached the bottom of the defect or make an estimate when in doubt. Measurements should be made using the deepest point of contact

Continued on next page

Tableau 5.1: List of observed deviations between WAI and WAD. Only the tasks where deviations were noticed appear in this table. See Appendix A for a full list of tasks and sub-tasks (Continued)

Work-As-Imagined in SOPs and inspection aids	Work-As-Done (these elements are the systematic adaptations that inspectors make to meet operational requirements and work demands)
- Compare defect with standards	- Interpret and compare defect's characteristics with relevant decision-making variables - Determine the decision-making variables applicable to the case. Retrieve and interpret variables from all relevant documentation, even conflicting directives - Optimize the internal process by manually repairing ambiguous defects with sandpapers. Remove light scratches on the part to prevent upstream operators from thinking the defect was not detected. (<i>*During a 150-minute observation, we noted that the inspector made 17 minor repairs using sandpaper.*</i>) - Assess whether planned upstream operations can eliminate the detected defect to avoid prescribing unnecessary repairs - Check the diagnosis of adjacent engine parts, as it changes the outcome of the current inspection
- Decision on defect/component	- Mark defects that need to be removed with a highlighter on the part - Send part to Material Review Board (MRB) if there is any ambiguity in the process
IV. Execution	
- Prescribe sets of repair operations	- Determine the legal applicability of the repair scheme - Verify if the repair scheme has already been applied during a previous shop visit. Ensure that maximum applications are not reached for the scheme concerned and any additional schemes that may be prescribed in conjunction with it - Annotate additional information that may be relevant to the operators on upstream operations - If necessary, measure part's thickness to ensure that the ratio will not fall below maximum allowable material removal tolerances after machining/polishing

5.3.2 Eliciting Engineering Design and Designers' Needs

Based on our fieldwork data collection, interviews with designers, and the identification of project designer milestones, the relevant data to be elicited relate to four of the five inspection & sentencing steps (Table 5.2, Figure 5.2). Designers either explicitly mentioned information about their needs concerning fieldwork data during Elicitation Interviews (Table 5.2), or these requirements were deduced according to engineering design milestones to be achieved. This dual approach allowed us to determine that half of the relevant data is in the diagnostic loop : key attributes for defect characterization ; the processing of information and decision variables ; application of situated knowledge and rules according to the constraints imposed by the work domain (Table 5.2, Figure 5.2 - III. Decision phase). The overall sequence of sentencing formalized in Figure 5.1 generates a common, situated representation of inspection tasks. Based on this representation and design needs, the relevant types of knowledge found in each task are presented in Figure 5.2.

Tableau 5.2: Explicit information (needs) requested by designers

Explicit Design Needs	Transcript
Decision Rules	<i>"Knowing how the inspector makes a decision, we don't have that kind of information (...) We're used to snippets of fuzzy data over a long period of time (...) Scheme or Diagram for us is just wow." – Automation Manager</i> <i>"It actually just clarifies the process. Right now, we imagine he's doing it [the inspector] in a certain way (...). The people working here on the inspection [system] need to understand the rules better and see them in practice." – Automation Engineer #1</i>
Task Clarification	<i>"How are they detecting and identifying edge defects? Sometimes, it's not perceptible in our images' acquisition" – Automation Engineer #2</i>
Fuzzy Point	<i>"Sometimes it is not clear in the Engine Manual [SOP]. They are no criteria for every class of defects. What are they doing [inspectors] in cases like that? Which tolerance should be applied? (...) If we have this information, we'll code it." – Automation Engineer #3</i>
Fieldwork Data	<i>"It will help us move forward [domain-specific knowledge]. Unfortunately, we rarely have the opportunity to do this work [fieldwork inquiries]. Our job is much more how to inspect many parts, and when we have questions, we ask them [clients] (...). Then, we try to put the puzzle back together." - Automation Manager</i>

Continued on next page

Tableau 5.2: Explicit information (needs) requested by designers (Continued)

Explicit Design Needs	Transcript
Defect Characterization	<i>"If we don't understand the different types of defects as characterized by human experts, we're shooting in the dark. Based on your information [Expert knowledge concerning the defect classification task], we could characterize not only the shape of the defects but also the contour [additional parameters to better characterize defects]. [...] "we can probably try to extract some information from the edges and see if we can differentiate between both nick and dent." - Computer Vision Researcher</i>

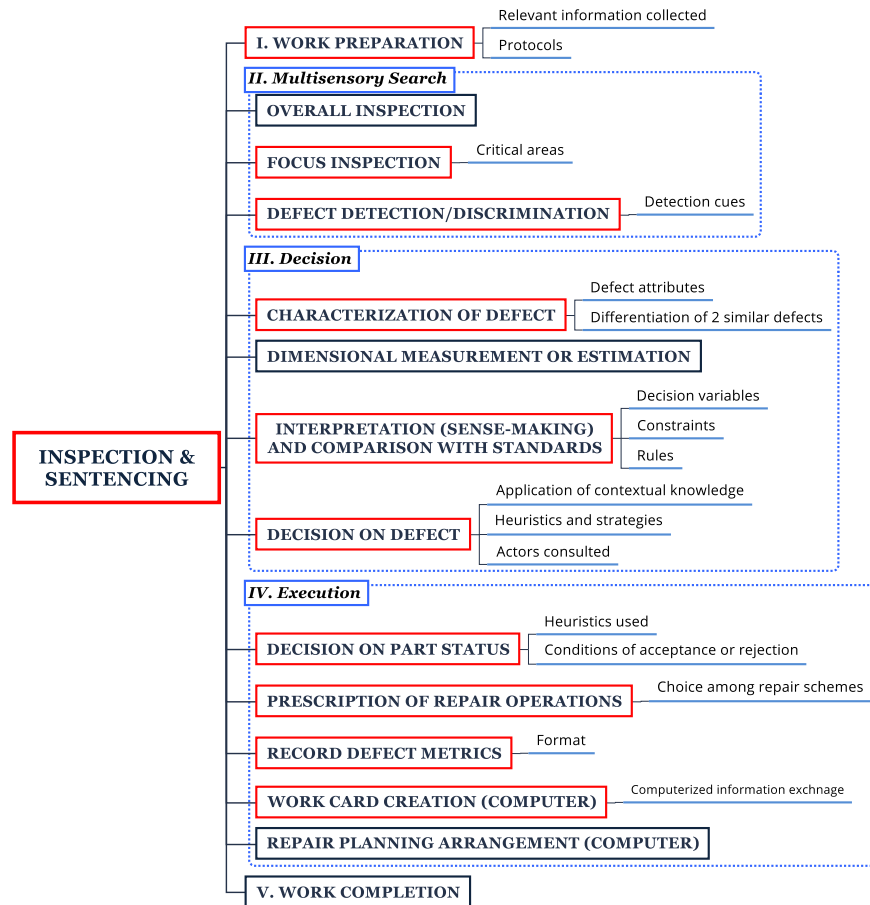


FIGURE 5.2 Relevant tasks (in red) and associated knowledge to elicit and represent according to inferred/explicit design needs

5.3.3 Visualizing Industrial Inspection for Cyber-Physical-Social System

In this section, we present our findings on the hidden complexity of aerospace industrial inspection in textual and visual forms using four models that emphasize different dimensions

of inspection : The Systemic Activity Model (section 5.3.3) ; the Defect Characterization Model (section 5.3.3) ; the Decision Tree Model (Section 5.3.3) ; and the Information Flow Model (Section 5.3.3). The intention here is to describe inspection by identifying and modeling aspects that will be necessary to design the CPSS. Thus, each model offers a unique perspective on deep cognitive processes and socio-technical work functions. The four models are tailored to align with designers' work packages and chosen for their ability to describe systemic mechanisms, such as domain rules and operator's behavior.

Systemic Activity Model

The Systemic Activity Model is a hierarchical disaggregation of work that formalizes tasks, operations, decision flows and contextual factors (Figure 5.3). It is an extended version of the overall sentencing sequence that emphasizes the situational aspect of work in a fine-grained fashion. This diagram proposes an overall view that describes how work is carried out and what the possible courses of action are. It also reveals the domain-driven constraints that can engender a particular sequence. In that sense, the model does have a system stance : it shows the interaction of domain rules, parts' condition, and inspectors' actions and cognition. The modeling formalism emphasizes the socio-cognitive dimensions of inspectors' work ; however, the perceptual-motor, physical and social dimensions are also integrated (Figure 5.3). Inspectors' activity is represented systemically by showing how the work domain constraints shape their cognition and action. Because the institution prescribes sets of rules that operators must follow, it depicts inspectors' reasoning : how they process and apply domain-specific knowledge (whether explicit or tacit) regarding domain-driven decision-making constraints. Each step of the decision-making flow is presented with alternative courses of action. Since some constraints are very situated, the model path highlights the strategies deployed by inspectors to overcome the constraints and limitations of procedures.

Inspector activity is complex and dynamic ; domain-driven factors modulate work performance and execution. The *search* and *decision-making* phases are certainly the most important tasks of the process. We present a thorough description of the *interpretation (meaning-making) and comparison with standards* task to which little attention has been given in the current literature and intended for partial automation. It is important to mention that this step does not appear in SOPs. Indeed, SOPs and inspection aids formalize the tolerance thresholds for the decision-making criteria (WAI). But how these elements are collected, interpreted and used with the part/defect in question constitutes the undocumented aspect of inspection in real working conditions (WAD). Moreover, project designers explicitly mentioned the need for more information about its operation (Figure 5.2 and Table 5.2). During this

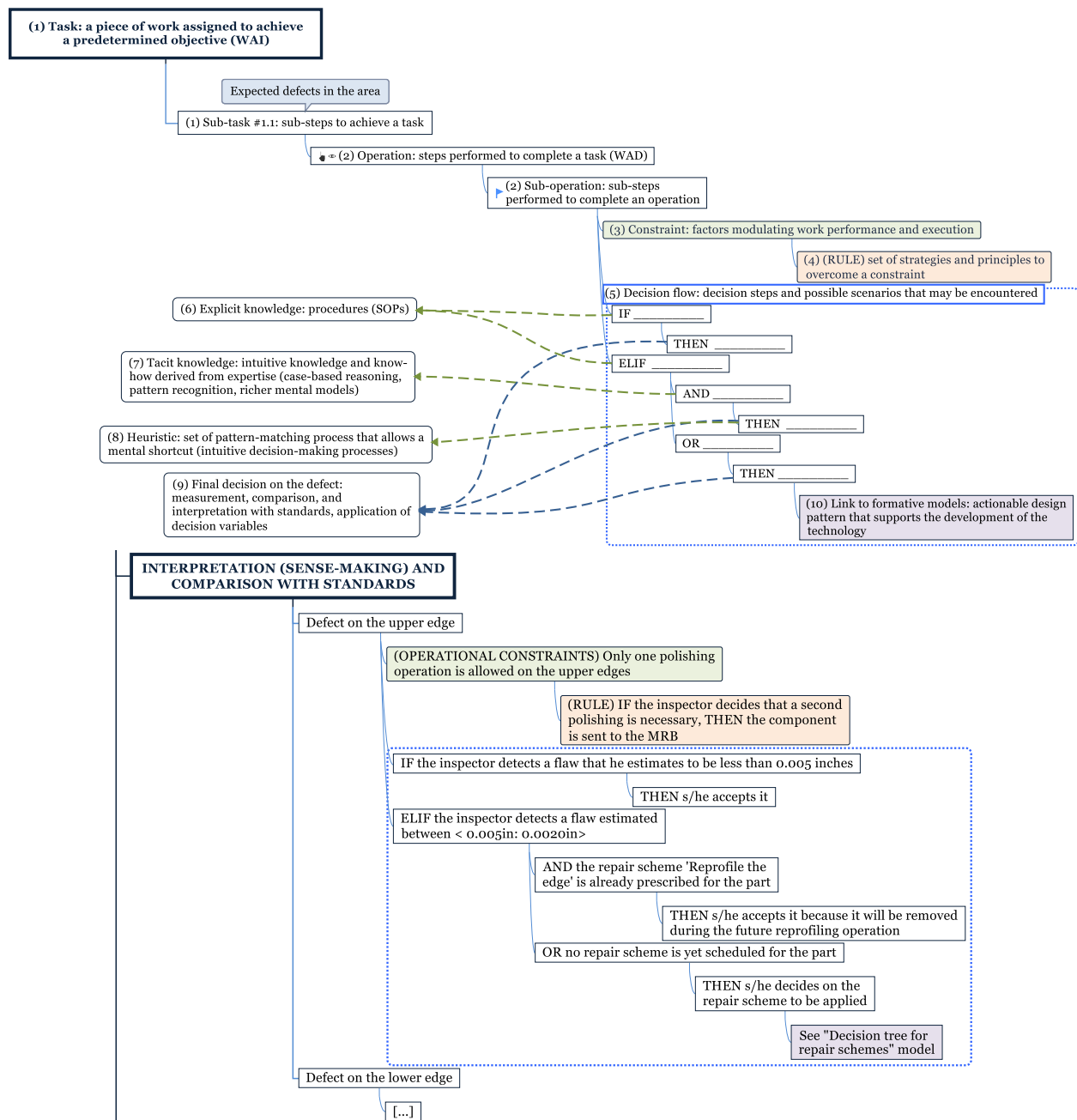


FIGURE 5.3 Systemic Activity Model features (top) and illustration (bottom) of the task *interpretation and comparison with standards*

task, inspectors evaluate the part's characteristics according to the work domain's decision-making variables to decide about the defect state : acceptable as is, acceptable with a repair, or not acceptable. Decision variables can refer either to the criteria they process during the decision-making loop or to the "decision constraints" (domain-driven factors) that influence the outcome, whether economic, socio-organizational, procedural, material, or knowledge-based (Table 5.3). They are specified in inspection aid documents that arise from domain constraints or experience (e.g., case-based reasoning). The main decision-making variable relates to the physical characteristics of the defect (decision-making variable #1 in Table 5.3). The SOPs list the tolerance thresholds for each combination of damage with the associated outcome : acceptable, repairable, or unacceptable. A combination of damage is represented by the type of damage, the location on the part, and its size in terms of depth, width, length, and circumference (decision-making variables #2, #3 and #1 in Table 5.3, respectively). Other important decision-making variables relate to the overall part's condition and history (#4, #6 to #6.2, #14 to #14.2 in Table 5.3). Repairing a defect involves machining and polishing operations that remove parent material. Safety policies and Original Equipment Manufacturers (OEMs) limit repair operations to avoid adverse effects on the reliability of aircraft engine components. During the *work preparation* or *decision-making* phase, inspectors check the repair operations that have already been performed on the part. Even if a defect is below the tolerance thresholds, the operator should reject the part if maximal repair applications have been reached and further maintenance is required. Other variables are related to human judgment under uncertainty (#2, #9 to #9.6, #12 and #13) and might disappear with process automation.

Tableau 5.3: Decision-making variables processed during diagnosis

#	Decision-Making Variables
1	Depth, width, length, circumference of a defect
2	Family of defects (defect classification)
2.1	Harmful defect for airworthiness and safety ("sharp" defect)
3	Area of defect's occurrence
3.1	Defect occurrence on critical area (attachment zone)
3.2	Defect occurrence on unregistered area ("gray area")
3.3.1	Defect occurrence on repaired area
3.3.2	Defect occurrence adjacent to a repaired area
3.4	Defect in-between two areas
3.4.1	Diagnose each area with relevant tolerance
3.4.2	Apply the most restrictive criteria
3.5	Defect extension into an unauthorized area

Continued on next page

Tableau 5.3: Decision-making variables processed during diagnosis (Continued)

#	Decision-Making Variables
4	Blending/dressing restrictions
5	Applicability of repair scheme
6	Repair scheme restrictions
6.1	Max applications reached for the scheme
6.2	Max applications reached for conjunctive scheme(s)
7	Additional instructions from local reference manuals
8	Optimization of the repair process
8.1	Defect removal by inspectors using sandpaper
8.2	Defect removal by downstream repair operations
8.2.1	Assigning defect to a nominal repair operation
8.2.2	Assigning defect to a non-nominal repair operation
9	Ambiguity in the process or human reasoning
9.1	Reachable area(s)
9.2	Measurement tools wear
9.3	Quality and perceptibility of a defect
9.4	Proximity to other defects
9.5	Physical characteristics borderline with tolerance threshold
9.6	Unclear/non existent instructions for defect's configuration
10	Risk of bottle necking the MRB
11	Interdependencies with adjacent part(s)
12	Centralization of repair operations
13	Number of batch parts affected
14	Part's thickness
14.1	Maximal material removal allowed
14.2	Current material thickness

In our activity sample in Figure 5.3, only one polishing³ operation is allowed in the upper edge area for the Fan Blade (see Figure 5.4 - decision-making variables #4 and #6 in Table 5.3). However, inspectors are aware that some finishing operations to remove defects are routinely prescribed when a surface depth is found between 0.005 and 0.020 inches (tacit knowledge and decision-making variable #8.2 in Table 5.3). Thus, it may not be necessary to prescribe polishing if the part is scheduled for particular finishing operations in the repair program. Inspectors assess, in real-time and case by case, the need to prescribe an additional repair operation, e.g., if the defect is more than 0.020 inches deep, to continue with our previous example. This working method ultimately reduces processing costs and turnaround time. Note that we did this kind of analysis for the entire inspection, but only a sample is presented in this document for confidentiality reasons.

3. Use of rotating pneumatic tool to restore a surface and make it smoother.

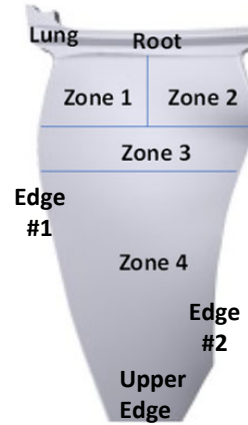


FIGURE 5.4 Different part areas for the Fan Blade

Defect Characterization with Fuzzy Criteria

The Defect Characterization Model is a structure diagram that defines the attributes that characterize each defect with fuzzy criteria : physical appearance, attributes/structural features, and expected areas of occurrence on the component (Figure 5.5). The model is somewhat similar to the object-oriented class diagram in Unified Modeling Language (UML) ⁴. The goal is to group each family of defects by listing the distinctive attributes that help inspectors recognize them. Ultimately, this model aims to help designers working on classification algorithms by making key features explicit, e.g., train the algorithms on the recognition of key features.

Identifying the type of damage is mandatory as tolerance thresholds differ from one class of defect to another. For the same depth and width, one defect might be repairable and another irreparable. Inspectors have developed strategies over time to classify defects better. This model describes the procedural and tacit knowledge mobilized by inspectors to classify damage types (the first step of the decision-making phase). We built the model based on internal documentation and *in situ* analysis. We obtained beneficial results from think-aloud protocols where inspectors verbalized the distinguishing attributes that characterize one defect or differentiate two relatively similar defects (e.g., nick and dent, Figure 5.5).

These attributes are shown in italics with the prefix "(*)" in Figure 5.5. For example, a "nick" is an impact defect that causes a vertical movement of the material along the defect contour (raised material). The presence of high material is distinctive for nicks. Inspectors rely on tactile or perceptual-motor feeling (using a stylus) to detect any material variation in the

4. Modeling language used in software engineering to define, test, and implement system requirements [364].

Nick	Dent
Appearance Shallow cavity (asymmetrical - heterogenous)	Appearance Deep cavity (uniform - homogeneous)
Attributes / Conditions - Tangential or angular impact (*) <i>Uniformity = no</i> (*) <i>Defect "floor" = sharp (stylus)</i> - Defect edges = sharp (touch= "catchy") (*) <i>High material = yes (usually)</i> (*) <i>Material displacement = vertical (raise material)</i> - Material removal = maybe	Attributes / Conditions - Tangential or angular impact (*) <i>Uniform = yes</i> (*) <i>Defect "floor" = "rounded" (stylus)</i> - Defect edges = smooth (touch= "soft") (*) <i>High material = maybe (unsual)</i> (*) <i>Material displacement = horizontal (material compression)</i> - Material removal = no
Expectations - Concave airfoil (near Edge #1)	Expectations - Concave airfoil - Edges #1 and #2
Fan Blades - Same tolerance limits in less critical areas (Zone 1, Zone 2), but deviations are observable in critical areas (Zone 3, Zone 4, Root) - Inspectors detect high material around defects using a scribe (stylus)	

FIGURE 5.5 Defect Characterization Model (screenshot). The original diagram contains the 16 defects that could appear on the component concerned

contour or the bottom (floor) of the defect (Figure 5.5). A "dent" has similar properties but with a horizontal material displacement. Finding high material around the damage is unusual. Moreover, inspectors have developed the ability to distinguish in-flight defects (external) and handling damages (internal). Based on the type of defect and its location on a part, and the inspector's overall knowledge of the engine (rich mental model), inspectors rely on causal reasoning to hypothesize about the defect's cause. In doing so, they can alert manufacturing engineers if they suspect a faulty internal process that generates recurring damage.

Decision Tree Model for Repair Operation Prescription

The Decision Tree Model is a sequential-alternative decision diagram that formalizes how inspectors decide which of the different repair schemes to prescribe. The model is structured in a hierarchical tree-like format and shows the criteria, constraints, and alternatives that inspectors must consider when deciding on the repair operation to prescribes. It presents the inspector's rationale for prescribing repair operations and thus shows how they process and apply the relevant decision-making variables for that task at the right time.

Prescribing a repair operation is the step that follows deciding that a part is salvageable. Inspectors process the relevant decision-making variables that apply to the case at hand. The Decision Tree Mode is structured based on the inspector's reasoning, starting with

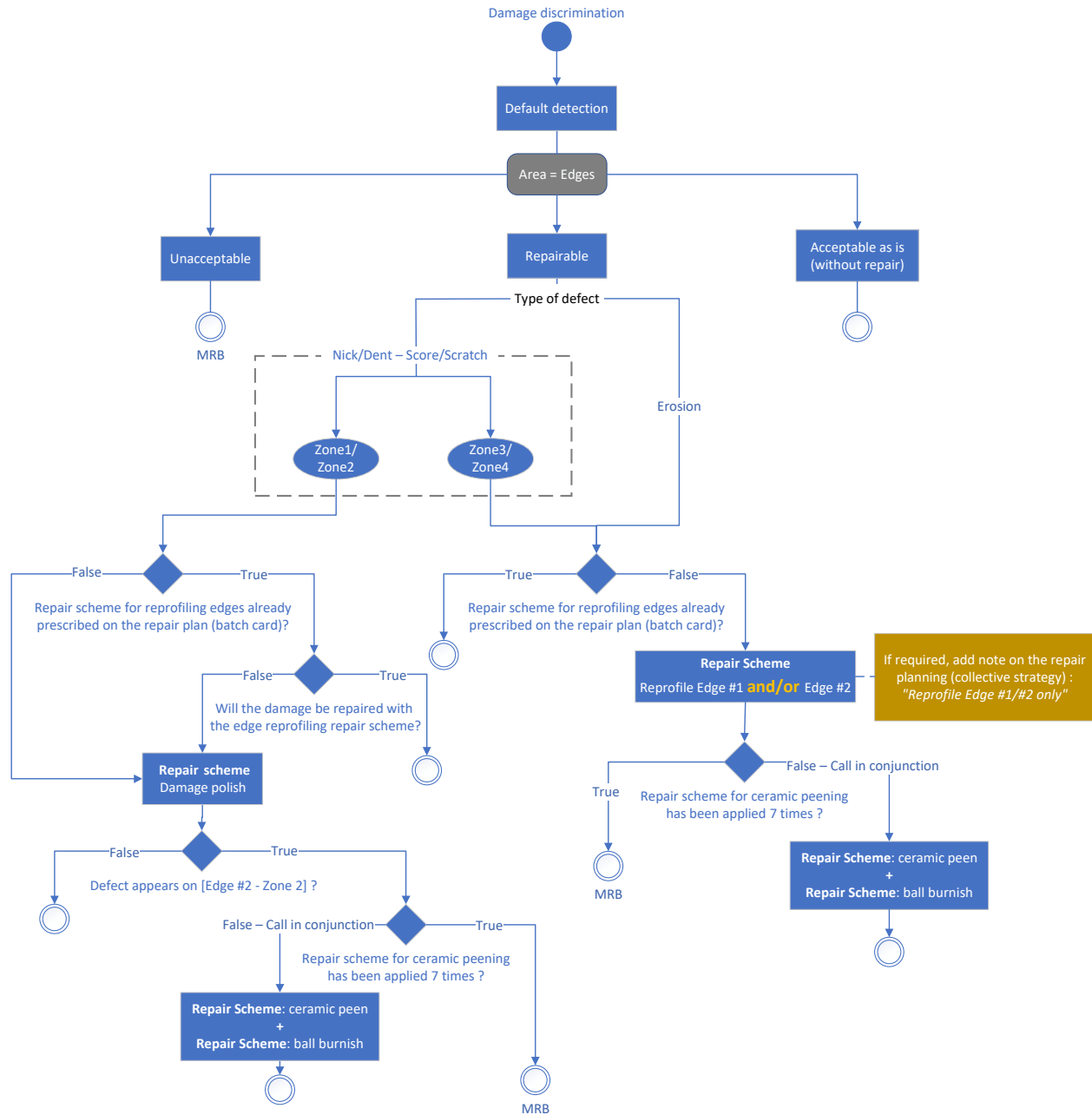


FIGURE 5.6 Decision tree-like model of repair prescription for edge areas

defect detection (Figure 5.6) :

1. Detection (discrimination) of defects : many defects may be concentrated in a single area. When a defect is judged to be borderline within a tolerance threshold or when the inspector spots a salient feature (unusual expectation), this operation stops and the decision-making process starts.
2. Location of the defect on the concerned part (decision-making variable #3) : they locate the area in which the defect appears. Tolerance thresholds differ from zone to zone. Criteria are more restrictive in critical areas. This example focuses on the part's edges, but similar tree-like models were made for the different locations and parts.
3. Classify damage type (Figure 5.5).
4. Dimensional measures (this step does not appear on the UML formative model) : physical measurement of the defect in terms of depth, length and width with tools.
5. Decision : they decide whether the damage is acceptable (as is), repairable (requires various repair operations to remove it) or unserviceable (the component is sent to the MRB⁵ with a notification that defines the case : "unserviceable defect found in ...").
6. Optimization/interpretation : inspectors evaluate whether a defect could be removed by an operation that has already been prescribed in the repair plan⁶ (optimization). They assess in real-time whether a repair operation already included in the repair planning could remove the defect before prescribing another (variables #8.2 and #8.2.1). One operation consists of reprofiling both sides of a part. When a side is acceptable, inspectors add additional instructions on the computerized work card specifying that only one side needs to be reprofiled. In some cases, inspectors may also manually repair a defect/side with sandpaper (decision-making variable #8.1) or assign the defect to a non-nominal operation after judging and confirming its safety with repair operators (decision-making variable #8.2.2). They improve process efficiency and components life cycle (each polishing removes parent material, which reduces the lifetime of a component). Inspectors carry out the same type of interpretation/optimization loop after verifying the dimensional measures.
7. Repair plan update : (re)plan the sequence of operations required to remove the defect and improve the surface finish. Prescribing one repair operation usually leads to prescribing other repair operations in conjunction to restore the surface fully, and enhance

5. Committee of experts (usually former inspectors or quality technicians) who deal with components labeled as non-conforming in the plant. For example, when the condition of a part is found to be unacceptable, MRB officers take over.

6. Repair plan : sequence of repair operations prescribed for one part.

the part's life cycle and reliability, e.g., surface polishing requires shot peening and burnishing the part.

8. Final decision.

Information Flow Model

The Information Flow Model is a functional-linear diagram that shows how information is structured and propagated in the work system (information intake, information sharing, and actors involved). The model is organized around the five main inspection phases, but the example here focuses on the decision-making phase (Figure 5.7). It shows the tasks for which inspectors use external information resources and their locations and format. Tacit knowledge acquired through experience is also incorporated into the model. The goal is to depict the pieces of information that inspectors retrieve, use and share to complete the inspection.

The information environment of aircraft inspection is distributed among several sources that comprise artifacts (inspection aids and procedures, vibro-engraved pieces of data on aircraft parts), actors, and time-related events (experiential knowledge) (Figure 5.7). The primary source of information is the inspection procedures, which provide procedural, explicit, and conceptual knowledge. These operating procedures are delivered by the OEM (SOPs), the institution itself (LOPs), and the client (client request). Each of these components interacts dynamically in that the results of an information intake can change the information flow or decision flow. Indeed, an inspector may reject a part that appears to be acceptable according to the SOPs but must be discarded according to the LOPs, e.g., when a defect needs to be machined, but the part has already received the maximum allowable repairs. Inspectors constantly assess a part's condition by making sense of several information sources (sometimes contradictory) for the defect/part interpreted. In addition to the procedures, valuable information can be found on the aircraft components (e.g., part number, repair operations performed) and computerized repair plan. Co-workers or other actors can provide additional instructions. Indeed, inspectors are interconnected with polishers, machinists, MRB officers, and production managers at different sentencing steps. They have developed collaborative strategies with operators to assess repair possibilities ("is it possible to polish this area without exceeding the limits of material removal?") or to facilitate each other's work by verbally transmitting additional instructions. This form of collective cognition prevents unnecessary repairs and thus enhances turnaround time and part life cycle. Because the sentencing output determines the various operations that a component must undergo to be restored, inspectors are also "work specifiers." They are responsible for updating the progression on the production board and informing the production managers each time a set is completed or a change is

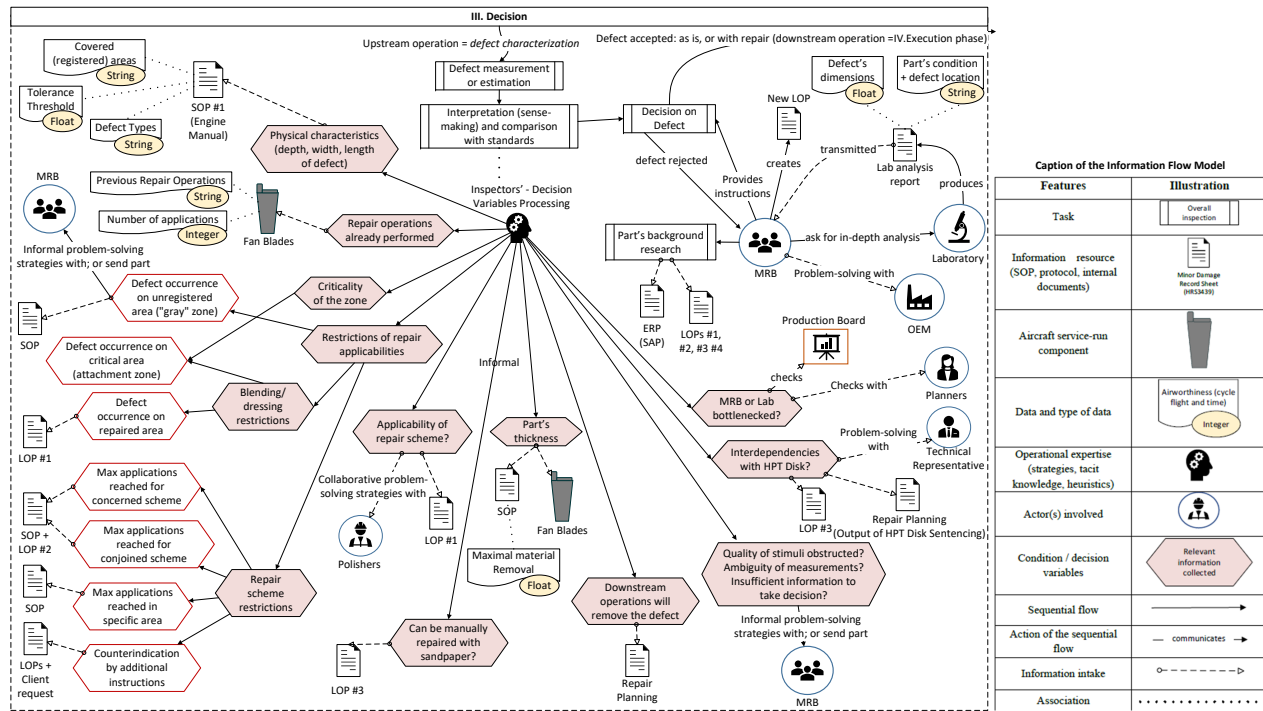


FIGURE 5.7 Information flow of the decision-making phase

made or required on the repair schedule (repair order, adding or deleting repair operations). With this information, planners can evaluate process capabilities and redistribute resources efficiently.

If an inspector determines or estimates that a defect exceeds the limits or does not have sufficient information to make a decision, they send a computerized report to the MRB describing the parameters of the defect (physical characteristics, location on part), the causes for rejection and the variables that determined their choices. MRB officers then take over, carry out background investigations (i.e., the part's track record), contact the OEM, and ask for laboratory analyses to give the inspector new instructions. Given that MRB procedures are costly and time-consuming, and risk bottle-necking the process, inspectors have developed strategies over time : they can help each other by exchanging information about past decisions made on similar cases (collective case-based reasoning) or perform a minor repair with sandpaper. Also, since MRB workstations are located on the shop floor, they are often directly consulted by inspectors without creating a formal report.

5.3.4 Alignment of Empirical Models with Technological Development

This subsection presents how the operational knowledge elicited and modeled is aligned with each design team's goals. We show how the fieldwork research output aligns with the design objectives and contributes to enhanced work packages for designers.

Design Team #1 – Data Management. The data management module designers want to understand the data requirements for all operations' stakeholders, i.e., what information the operators use as inputs and outputs. They develop a database that defines the data management structure needed for the inspection, sentencing, and repair processes to prepare process automation (and digitization). Researchers on this work team benefited from the empirical models in two ways. First, it informed their understanding of the work domain semantics to define a suitable data structure : the domain actors, rules, terms, and constraints (information needs in Figure 5.8). Indeed, structuring the conceptual data model involves defining the relevant concept with the associated properties (or information) and relationships within the work domain. For example, inspectors interact and exchange multiple kinds of information with operations stakeholders such as polishers, MRB officers, technical representatives.

An Information Flow diagram was presented by the human factors team, which helps to define the suitable data structure for each stakeholder.

The Information Flow Model formalizes data flows, sources, format (integer, float, or string), and information intake and sharing objectives. This knowledge was incorporated during the conceptual and logical (detailed) database design. Alternatively, the models (and more broadly the analysis of inspectors' work) alerted project designers to data requiring additional human intervention to be digitized, such as the characters that operators vibro-engrave to track which repair operations have been applied on the part.

The inspection activity diagram supports the data management task in mapping the inspection work activity and identifying some important information, especially information related to defect characterization, type and geometry. This information is useful for building the SARA system data model. Moreover, the Defect Characterization Model helps to define the decision-making variables. Accordingly, this information feeds the data model as rules that determine whether the defect is acceptable or not.

Project Customer (Factory). The plant stakeholders' role is to define the system requirements and support the design teams in their technological development. From a knowledge management perspective, the empirical models revealed and captured the specific *know-how* for each inspection task. This process informs the factory of the complexity and undocu-

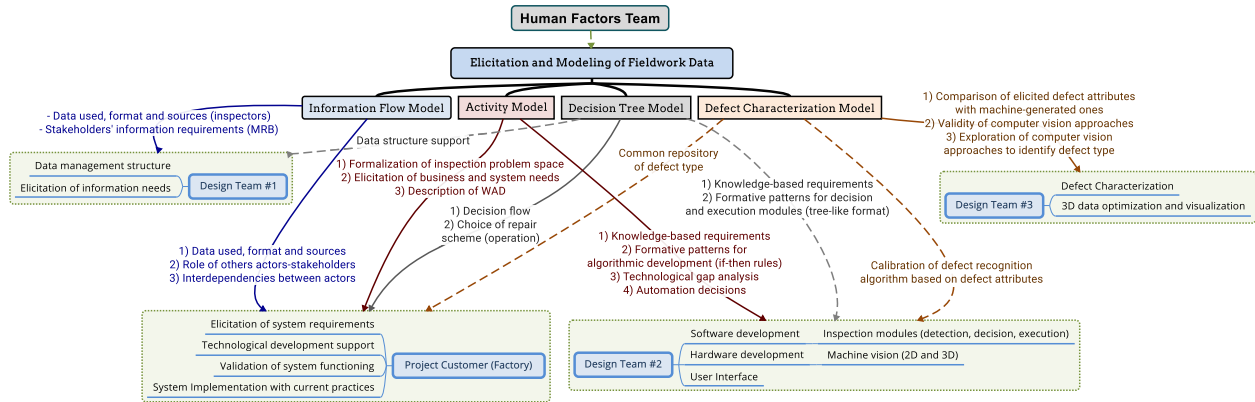


FIGURE 5.8 Alignment of empirical insights with the technological development pursued by each design team. Solid lines represent the demonstrated contributions of the models, and dashed lines are the expected ones

mented aspects of inspectors' problem space (Table 5.1), which supported the definition of business needs and the system requirements (Figure 5.8, Activity Model and Information Flow Model). Indeed, SOPs define the explicit knowledge required for a task (acceptance/rejection criteria); however, they seldom provide guidance regarding the execution of tasks (Figure 5.8, Decision Tree Model). The combination of thick descriptions and empirical models capitalizes on several elements of the WAD : information intake mechanisms and sources to pursue the operational objectives, meaning-making processes, decision criteria, application of domain-specific knowledge in the problem space composed of domain constraints.

Thus, the major impact of empirical models for these stakeholders is that they allow expected system functions to be compared with inspection-as-done to identify potential technology gaps. The significant outcome of this comparison is that inspectors will have an important role to play in future workflows. The empirical models, and more broadly the analysis of inspectors' work, allowed the design team to transcend the initial design solution and achieve a more holistic perspective. The initial design logic was to automate the inspection process by implementing a Cyber-Physical System (CPS). Given the complexity of hands-on inspection (WAD), the design team moved toward a socio-technical vision called the Cyber-Physical-Social System (or Human-Cyber-Physical System), where the inspectors' skills and knowledge are central for completing the work requirements. In this human-centered design philosophy, their perceptual and cognitive abilities are enhanced in computer-aided inspection scenarios⁷ rather than "being replaced by automation." Finally, the models allow the company to understand the social dimension of inspection, i.e., the collective strategies in

7. We are currently documenting this step-by-step evolution in an intervention-based article.

place with the other actors of the socio-technical environment to enhance process efficiency (Figure 5.8, Information Flow Model). The Information Flow Model abstracted the interdependencies and shared strategies between inspectors and the other actors.

Design Team #2 – Design of SARA Hardware, Software, and User Interface. Design engineers on this team do most of the work to automate the inspection process. To do so, they develop machine vision-based solutions that are composed of cyber (software programs) and physical components (robotic arms and cameras)⁸. This development requires integrating domain-independent knowledge (e.g., camera calibration to detect surface defects) and domain-specific knowledge (e.g., domain decision criteria). We performed design-related inquiries specifically to inform the latter and support the development of software modules. SARA's cyber component is composed of software programs nested within each other to form a module. Each program "replicates" a specific aspect of the inspection. For example, the system performs image acquisition via the cameras to search for potential damages, which corresponds to the focused inspection part of human work content. The software sequence can be summarized as follows : (1) image acquisition ; (2) defect detection ; (3) defect measurement ; (4) defect classification ; and (5) decision (go/no-go). We determined that domain-specific knowledge would add value to the classification and decision programs. Classification of defects and decision space is highly context-dependent and should be programmed with pieces of WAD knowledge. The hierarchical tree-like format allowed the designers to extract and incorporate missing pieces of knowledge in the existing decision programs (mainly the Activity Model and Decision Tree Model, Figure 5.8). Second, the models and ensuing discussions helped make design decisions about which functions are worthy of automation and which are not (definition of system requirements in Figure 5.8). For example, we know that the system will not fully detect previous repair operations, even with additional technological developments. This taskwork must remain as a human function in future human-automated work scenarios. Thus, the second outcome of the use of empirical models in the design process is the assessment that the decision module does not consider all the problem space's decision criteria. Based on this crucial finding, we can derive implications for SARA's design as a Cyber-Physical-Social System (see Subsection 5.4.3). Formalizing WAD enables the use of human expertise as a benchmark to assess SARA's technological capabilities and make design decisions, i.e., what SARA is or is not capable of doing. However, further work is needed in this area and will be the subject of a future article. Finally, the Activity Model, Information Flow Model, and Decision Tree Model formalized the domain-specific knowledge required for each task, contributing to the orientation of future technical development, e.g.,

8. Also called Cyber-Physical Systems.

SARA database.

Design Team #3 – Defect Characterization (Computer Vision). The researchers on this work package are responsible for characterizing defects by extracting relevant information from 2D and 3D images, such as defect shape, depth, and slope. Their work packages also enhance SARA's defect detection capability, which relates to its perceptual modules. They develop image processing algorithms to extract features from 3D point clouds to best extract, characterize and display defects to human operators. Based on computer vision, defects are characterized using various parameters (e.g., defect dimensions and deepest defect point) to extract the features that define what is seen in the images. This features-based extraction ultimately outputs a classification or a characterization. For the researchers on this team, the Defect Characterization Model's (Figure 5.8) contribution is twofold. First, "the diagram was useful to us for assessing the validity of our computer vision approaches for describing the defects." It enabled them to compare the attributes of the different defect categories with the computer vision parameters that could contribute to their characterization. In other words, inspectors characterize defects using human criteria, and computer vision utilizes extracted image properties (e.g., deepest point, number of defect points, or covariance matrix). The diagram allowed researchers to identify and compare how computer vision parameters could define specific defect criteria used by an inspector. For example, to differentiate a nick from a dent, the contour of a defect must be analyzed to see if there is any raised material that would indicate a "nicked" impact. "We could add some information on the edges because [Researcher #1] has everything that we need to look at the edges and maybe [...] we could characterize not only the shape of the defects but also the contour based on your information." Second, the models were useful for "assessing whether or not our approaches could be used not only to detect the defects but also to identify the type of defect." Researchers started to explore their algorithms' ability to classify several types of defects of the same family (nick/dent, score/scratch). Indeed, the information that caught their attention comprises "the different defect categories, the way the defect types were described and the methodology that the human inspectors used to characterize the types of defect." As this team's academic leader mentioned, "all of the above will be useful to our team for improving our defect detection/characterization approaches, especially defect characterization."

5.4 Discussion

This study was designed to discover the groundwork complexity of aerospace industrial inspection using a systems ergonomics and modeling approach to support the overall design of a

Cyber-Physical-Social inspection System (CPSS). In this section, we discuss (1) the empirical contributions of the paper to aerospace industrial inspection, (2) the practical implications of our methodological choices, and (3) the design implications for the CPSS.

5.4.1 Diagnosis in Aerospace Industrial Inspection

This research makes empirical contributions to the understanding of diagnosis in aerospace industrial inspection. The application of systems ergonomics methods has generated a multi layered description of industrial inspection : from a socio-technical perspective to a thorough study of inspectors' cognitive activity, and with a representation of the domain-related constraints that influence work [16]. To the best of our knowledge, this is the first study to describe and model industrial inspection with micro, meso, and macro perspectives on "work". Below, we discuss the individual and collective perspectives that this work has brought to aerospace industrial inspection.

Individual Aspects of Industrial Inspection. This study complements previous findings on inspectors' meaning-making and decision-making processes in real-world settings. [317,323] found that there are at least four reasons for the complexity of the information inspection environment : *multiple information sources*, *parallel information paths*, *ill-defined acceptance criteria*, and *multi-criteria defect diagnostics*. The application of several data collection and representation methods provided crucial additional information about the multifaceted problem space that inspectors face during diagnosis. The most significant contribution of this article on industrial inspection is the list of decision-making variables. Inspection is based on processing the relevant variables for the case encountered. It is interesting to contrast the WAI/WAD gap by specifying that the decision criteria are formalized in the SOPs and LOPs. However, searching, retrieving, and interpreting the information to apply it to the case at hand constitutes the inspection's invisible (undocumented) aspect. We therefore agree with [6] on the importance of developing systematic methodologies to capture the tacit dimension of work in order to support and shape technology development. Indeed, this work should not be underestimated, especially for automation in safety-critical areas, where failure to address relevant decision criteria can have adverse consequences for aircraft safety.

Collective Aspects of Industrial Inspection. Previous studies on industrial inspection mostly documented the practice from a person-oriented perspective [6,8,313]. To our knowledge, this is the first study to look beyond individuals and extend the scope of analysis to a socio-technical perspective. [313,323] present some insights into aspects of inspectors' collaborative work in industrial settings. However, neither of those studies used a system thinking approach to describe inspectors' interdependencies with several components of the work sys-

tem (actors and artifacts). Thus, the first outcome of this study is that empirical models combined with thick description offer insights into the inherent complexity of contemporary inspection in industrial settings, especially inspectors' interaction with procedures, safety policies, artifacts, and co-workers. Our work analysis shows that inspectors are not isolated actors but play a prominent role in the "*decision ecosystem*." For instance, in prescribing repair operations to restore a component, inspectors determine the amount of rework that needs to be performed by other actors in the work system, which ultimately influences the company's profitability. In addition, our systems approach has highlighted the fact that inspectors rely on key collaborative strategies to process decision variables, produce correct outcomes, extend parts' life cycles, and reduce turnaround time. Specifically, the Information Flow model (Figure 5.3.3) defined these interrelations and the workarounds conducted by inspectors through informal communications with socio-technical actors to process some decision-making variables. Since some decisions may be costly for the company, this type of undocumented strategy (WAD) has been considered as an *economic maximization* phenomenon [365]. However, this work has revealed how inspectors solicit the workgroup to optimize economic and socio-material outcomes.

5.4.2 Aligning Fieldwork with Technical Development

The methodological underpinnings of this paper have some practical implications (Figure 5.9) in addressing the long-standing gap between analysis and design [233–235, 366]. To bridge this gap and provide actionable design insights, we aligned fieldwork inquiries with design objectives (*Data Alignment* in Figure 5.9). The alignment of data collection and representation needs to be proactively considered at the outset of the design process, which was conducted through semi-structured interviews and focus groups with designers. In our methodology, we identified the design milestones, the actors involved, and their needs, which ultimately oriented the different units of analysis for data collection (*design-related*) and the co-definition of an actionable representation structure (i.e. empirical models). The empirical models can be seen as boundary objects as they had multiple roles and *ways of functioning* in the technical development process [7]. Table 5.4 lists the different functions that emerge from the empirical models within the system design process. Our results are similar to those of [73] : models alone provide some guidance to designers. However, fostering discussions about SARA's future functioning using empirical models as a verbalization aid (boundary object) vastly increases their usefulness compared to simply "transferring" data to designers. Second, they created a shared understanding of work complexity and drew attention to challenging elements in the system design stages. Concurrent studies of work domain components and designers' goals and means enabled the establishment of knowledge sharing and integra-

tion mechanisms. These joint endeavors are by nature iterative : empirical models are refined in response to new questions from designers as they progress through the design process, resulting in additional fieldwork inquiries and modeling sessions. We also distinguish between comprehensive and design-related fieldwork inquiries (Figure 5.9). The HF&E researcher’s questions and hypotheses about the work’s domain characteristics drove the former, while the system design milestones drove the latter. The outcome is two complementary design resources : formative patterns derived from empirical models and in-depth textual insights.

Tableau 5.4: Empirical models’ functions in the design process

Models Functions	Explanations
Design decisions	Empirical models have supported the design teams in identifying and selecting which functions/tasks can and cannot be automated, and the ones that are worth automating
Parsed (incorporated) formative patterns	Extraction of relevant domain-specific knowledge that is parsed in existing lines of code or triggered the need to create additional computer programs. For example, inspectors’ rationale in prescribing repair operations
Technical assessment	Evaluate the proper functioning of a (sub)system by providing <i>ground truth</i> against which researchers can compare, measure, and assess the validity of their approach. <i>Ground truth</i> refers to the system-centric and expert-centric domain-specific knowledge that we have elicited and modeled
Elicitation of business needs and system requirements	Definition of system functionalities and orientation of technological development that was not anticipated but emerged from empirical models. For example, some critical data are manually engraved into specific parts’ areas and helps identify previous repair operations. Since the system cannot read these manual patterns, it must provide an interface to allow inspectors to enter the information manually
Workflow reconfiguration	Anticipation of tasks and decision-making variables that will necessitate a joint human-automation endeavor to be accomplished

Describing and modeling the current workflow has highlighted the semantics of the problem space inspectors deal with : tasks, decision criteria, and knowledge that SARA needs to incorporate/execute. We argue that, before implementing CPS(S) in real work environments, the specific application of knowledge in the problem space must be elicited and represented to the design team in a way that can provide in-depth, actionable insights for system design. In this paper, empirical models have represented this problem space from several angles.

The Systemic Activity Model served as a foundation by breaking down the possible actions and decisions during the inspection according to the situated parameters of the domain. Then, the Defect Characterization and Decision Tree Models provided granular layers of information that depict the conceptual knowledge (defect characteristics) and procedural knowledge (step-by-step reasoning) that inspectors rely on to diagnose parts' condition and prescribe appropriate repair operations. These two models are complementary in that they focus on specific inspection elements that were difficult to incorporate into the Systemic Activity Model or that might have impaired its clarity. In addition, the chosen modeling formalisms are also more suitable for integration into computer programs, as they are close to UML-oriented objects [233]. The Information Flow model differs from the three other models, as its objectives and theoretical underpinnings are slightly different. Because it is rooted in the theory of distributed cognition [340], it describes how information is structured and propagated in the work system. The Information Flow Model complements the System Activity Model by describing the nature, timing, and source of information and the socio-technical actors whom inspectors consult when diagnosing parts' condition.

5.4.3 Design Implications

The risk with automation is the misconception or simplification of WAD in the lines of code. Modeling the inspectors' reasoning allowed us to define all the tasks performed with the specific knowledge used, in order to avoid automation-related surprises [38]. Since the innovative solution will perform a certain amount of information-processing and decision-making operations, it is crucial to identify the domain-specific knowledge required and how to apply it regarding the domain-driven factors that constrain the performance of work. The CPSS being designed must ensure compliance with the institution's regulations, rules, and protocols to generate reliable output. Otherwise, inspectors may not fully embrace the system, may mistrust it, or may find its use costly in terms of additional work to address *technological deficiencies* [13]. In this project, the expected technological capabilities will be limited to performing all inspection tasks, such as processing multiple data sources from the problem space. Inspectors' role will be essential in the future workflow to perform concurrent high-level tasks and monitor SARA's output [367]. To ensure the ecological validity of the designed system, the operating context must be understood, and decision choices must be based upon this understanding. With the current state of knowledge, the essential decision variables and work functions that will remain in the envisioned context are related to work domain protocols, policies, and regulations. The variables related to repair restrictions (e.g., decision-variables #4 and #6 in Table 5.3) will remain because they are formal instructions from the OEM to avoid any unsatisfactory effect on aircraft safety. On the other hand,

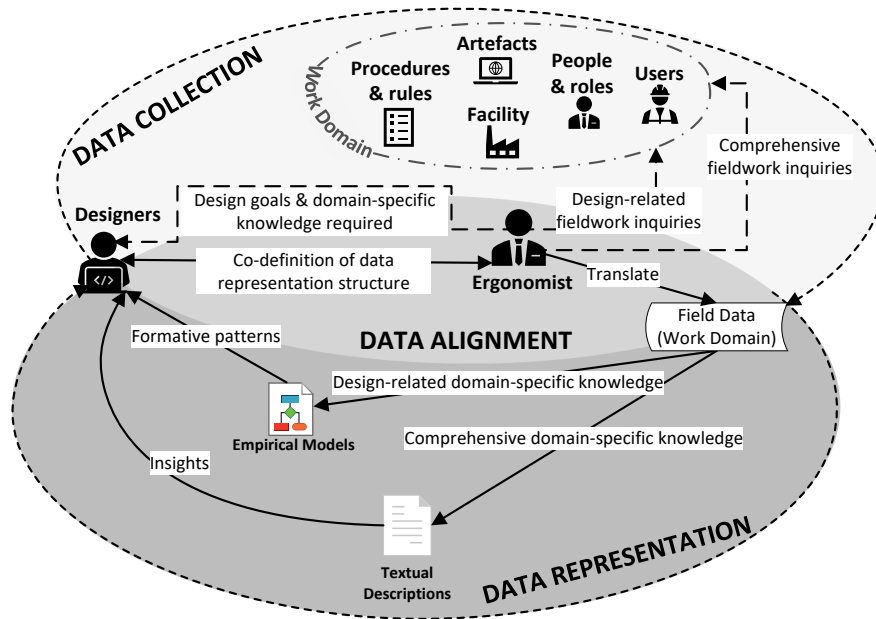


FIGURE 5.9 Triadic role of ergonomists in system design

human-related variables, such as ambiguity of dimensional measurements (decision variable #9.5), are likely to disappear since SARA will take over the measurement function. Other variables may require actions from both entities to be completed. For instance, some machine-unreadable data (e.g., additional instructions in textual format – decision variable #7) may be manually inputted by operators. Alternatively, the operators may bypass the maintenance plan formulated by SARA to optimize the repair process based on extensive knowledge of internal machining processes. Furthermore, the innovative solution should not hamper collaborative work functions. Instead, inspectors must deliver the same information as in the existing work situation to continue to work as a team with other actors in the domain (see 5.3.3 for shared strategies). To proceed with the envisioning process, we contend that the work requirements associated with processing decision-making variables should serve as a starting point from which automation design decisions may be hypothesized. The design team must carefully assess technological capabilities to process the decision criteria and fulfill the work functions to ensure the outputs' validity. From a Human-Automation Teamwork perspective, these variables need to be reassigned to the system and the operator. The reassignment of work components in the envisioned solution space should consider several factors such as human/automation capabilities, domain-driven constraints (rules, procedures, regulations), interaction requirements, and ethics [13, 82, 133].

5.4.4 Limitations and Future Work

This study was conducted in just one Canadian organization. The empirical findings of this research should be considered in the context of one in-depth case study. We performed our observational studies on the three engine components selected for the SARA project. Nevertheless, we argue that the geometry of the selected parts reflects the fleet of other engine components and the socio-cognitive work required to inspect them. Concerning data collection, the diversity of actors observed/interviewed lengthened the time and effort needed to reach a consensus. Some researchers used group interviews to speed up the consensus-building, which could be of interest for future fieldwork [21,226]. Finally, the results presented so far are overly descriptive and assumptive. As we move forward with the research project, we will provide concrete cases of how empirical findings generate actionable design specifications for the CPSS [13,164]. We suggest exploring the solution space ecologically by linking technological capabilities to the characteristics of existing and envisioned work situations [13,134].

To conclude, this paper described and visually represented the hidden complexity of industrial aerospace inspection (Work-As-Done) to support the design of a Cyber-Physical-Social System (CPSS). Our contribution is threefold. First, we extended the knowledge of industrial inspection by offering a multi layer perspective : from a sociotechnical approach to an in-depth examination of inspectors' cognition. We have delineated the complex sense-making and decision-making processes inspectors apply, emphasizing individual and collective strategies to compensate for procedures' limitations and other domain-driven constraints (Work-As-Done). Second, our methodological choice allowed us to represent and align fieldwork with technological development. The empirical models facilitated the understanding and visualization of inspectors' problem space. Indeed, the CPSS being designed must integrate the rules and relationships among the problem space components to generate reliable results (ecological validity). Moreover, by eliciting the designers' goals and co-defining appropriate modeling formalisms, we have established a mechanism for cross-functional knowledge sharing and integration. Third, potential implications for the next steps in design were discussed, including inspectors' dominant role in the envisioned work situations and the necessary reallocation of crucial decision-making variables and tasks. These insights should be further explored in different human-automation teamwork scenarios to hypothesize, simulate, and validate the envisioned domain's parameters.

CHAPITRE 6 ARTICLE 2 : TRANSITIONING FROM INDUSTRY 4.0 TO INDUSTRY 5.0 IN THE DEVELOPMENT CYCLE : AN ACTION DESIGN RESEARCH IN INDUSTRIAL INSPECTION

Cet article a été soumis dans le *International Journal of Production Research* en date du 29 avril 2022. Le statut de l'article a changé pour "Revision Required" en date du 15 août 2022.

Cabour, G. (Polytechnique Montréal), Ledoux, É. (UQAM), Bassetto, S. (Polytechnique Montréal)

Par manque de temps, il n'a pas encore été possible de procéder aux corrections de l'article. Nous résumons ci-après les différentes critiques et corrections que nous envisageons de faire. Celles-ci se résument en trois catégories. Le premier concerne le positionnement que nous avons adopté dans l'article : "Transition Industrie 4.0 à 5.0". Les réviseurs estiment que malgré des résultats pertinents, notre article ne se situe pas dans les logiques de l'I4.0 qui met en avant l'interconnexion des technologies entre-elles. Ils suggèrent de modifier notre positionnement en parlant d'avantage de "Transition d'une démarche axée technologie (*technology-driven*) à une axée travail (*work-driven*). Nous sommes en accord avec ce commentaire et procéderons au changement de positionnement. Deuxièmement, les réviseurs estiment que dans sa forme actuelle, les apprentissages de l'article ne sont pas assez généralisables pour être intégrés dans des recherches ou pratiques futures. Ils suggèrent de rajouter une sous-section qui résume, sous forme d'orientations méthodologiques (*guidelines*), les différentes étapes de ce travail. Nous sommes aussi en accord avec ce points et allons détailler les éléments présentées à la Figure 6.6. Enfin, la dernière catégorie de critique l'article concerne quelques points de forme sur la restructuration du résumé et la division des parties discussion et conclusion.

Abstract

The trend toward automating industrial inspection is becoming a preferred solution to reduce workload and enhance the overall performance of this labor-intensive work. However, design solutions are envisioned mainly from a technology-driven perspective (Industry 4.0), neglecting how Industry 4.0-enabled technologies may be integrated into industrial environments and operate alongside humans (Industry 5.0). Through an action design research, this article demonstrates the deliberate paradigm shift from Industry 4.0 to Industry 5.0 during a highly innovative project in aerospace. We first describe the socio-technical artifacts created to anticipate the shortcomings of the maturing technology in autonomously performing inspection

tasks. The results confirmed the necessity to keep operators in the loop to reach the desired solution state. We then describe the intervention cycles that materialize a work-driven transition, focusing on the scope of human-automation teamwork design. This article contributes to a better understanding of the design decisions and socio-technical artifacts that actualize a transition to Industry 5.0. Future research is needed to develop an integrated framework for designing human-machine teams that systematically embed work domain parameters and requirements.

Keywords - Human-automation interaction; industry 4.0; human factors; ergonomics; design science research; hybrid intelligence

6.1 Introduction

Industry 4.0 (I4.0) digitizes the industrial value chains to drive economic growth and maintain businesses competitiveness [29]. This transformation is expected to provoke a drastic change in human work at the strategic, tactical, and operational levels [31]. These predictions are echoed in several disciplines, such as Human Factors & Ergonomics (HF&E) [32], Industrial Engineering [29] and Operations Management [107]. Nonetheless, humans are underrepresented in Industry 4.0 research stream, even considering their centrality in future production environments [31,32]. As the design of such technologies involves extensive technical challenges, research groups focus their efforts on developing hardware/software components, neglecting socio-technical aspects such as end-users and domain complexities [112]. From an HF&E perspective, considering both technical and socio-technical factors is essential to materialize the expected benefits [368].

Industry 5.0 (I5.0) was introduced to counteract the drawbacks generated by I4.0's technocentrism [40]. In I5.0, humans and machines co-operate to achieve common operational goals [39]. This more human-centric perspective gives equal attention to humans and technical requirements [47]. Not only does the consideration of the socio-technical facet improve *productivity, technology implementation, quality, and reliability of the system* [32, p.6], but the added value of this design paradigm comes from a seamless human-automation interaction [54]. Indeed, I5.0 focus on augmenting humans with new technologies, not on sustaining them through technology [39]. However, the current body of research does not empirically support these claims [31]. Nor does it provide concrete guidance for designing human-automation teams, i.e., design guidelines to determine how humans and artificial agents will collaborate in operational environments [47]. Designers need tools, frameworks, and design principles to systematically align technology development with human capabilities and situation-specific modalities [65].

This paper tackles these gaps through an action design research [22] in aerospace maintenance. Our work is part of a multidisciplinary R&D project that aims to develop a machine vision-based robot that detects surface defects on aircraft components and decides its acceptable or unacceptable status. This critical activity is performed by highly trained inspectors who scrutinize service-run components for potential anomalies. Given the ever-increasing customer demands and the critical nature of the work domain, process automation is a preferred solution to improve productivity-related and safety factors. An initial technology-driven pathway (I4.0) was envisioned to produce the technological solution. An opportunity arose when one of the authors conducted a field study to document inspection as-practiced [28], which initiated a work-driven transition. However, switching to a work-driven pathway does not rely on presenting descriptive work-as-practiced findings to developers. It requires the deliberate anchoring of anticipated technological capabilities in the operational processes [70].

Therefore, this paper exhibits the intervention-oriented activities that actualize a work-driven anchoring (I5.0). We show how we articulated the knowledge obtained from the work domain analyses with the technological attributes to achieve the *desired design end-state* [13]. This overall objective is broken down into two sub-objectives. The first is to anticipate the capability gaps of the maturing technology in autonomously performing inspection tasks. To do this, we performed a functional comparison between the current human work with the automated solution (called *technology coverage*). The second sub-goal shows how we progressed from the current work situation to the joint human-automation teamwork situation. We show the methodology deployed and the socio-technical artifacts created to envision future human and machine roles, functions, and interdependencies.

6.2 Related Literature

This section briefly reviews the literature related to our work, namely Industry 5.0, human-automation teamwork, and industrial inspection.

6.2.1 Industry 5.0 and Human-Automation Teaming

Industry 5.0 (I5.0) is a human-centric perspective of I4.0 that explicitly reintegrates humans into digitalization processes [39, 369, 370]. Despite the variability of I5.0's definitions, the guiding principle concerns increased human-automation proximity and collaboration in workplaces [39]. This human-automation teams (HATs) appears under several different names in the literature : Human-Centered AI [138], Human-Cyber-Physical System [189], Operator 4.0 [189], Hybrid Intelligence [15], and Human-Automation Teaming [369]. These HATs are

expected to be more efficient and resilient by combining human brainpower with the computing capabilities of machines [39,370]. This could improve performance-related factors and working conditions by shifting labor-intensive tasks to automated systems so that humans can focus on value-added tasks [39]. However, the simultaneous consideration of technological and social factors raises important technical, ethical and operational challenges [369]. [39] listed multiple design challenges associated with human-machine partnership, from security to system scalability. There is also skepticism regarding the acceptance of I4.0, manifested workforce's needs to acquire new skills to use the technologies or the fear of job loss due to mass automation [371]. These challenges and ethical issues require that the design of I4.0 technologies be more human-centered.

[54] distinguish between three I4.0 design rationales. A *technology-centered* rationale, where AI is the only entity with true objective intelligence; humans being physically and cognitively limited. A *human-centered* rationale where AI must augment human intelligence since the technology lacks high-level cognitive functions that enable consciousness and moral reasoning. A *system-centric* rationale where true intelligence is found in the continuous interaction of multiple biological and artificial entities. They argued that a technology-centered approach fits finite, closed-loop environments (e.g., chess games), while a human- or collective-centered view is well-suited to open, infinite environments (e.g., healthcare systems). Several approaches have been proposed, in line with the three aforementioned rationales. [32] proposed a framework for the systematic considerations of HF in I4.0. This provides a micro- and macro-perspective to integrate HF during technology development projects. Similarly, [49] has developed an architecture that integrates shop-floor operators in I4.0 design processes to envision their future roles in interconnected environments. [15] established a Hybrid Intelligence taxonomy for human-automation teams based on four pillars : *task characteristics*, *learning paradigm*, *human-ai interaction* and *ai-human interaction*. Another notable taxonomy is the Social Artificial Intelligence Layer (SAIL), which also emphasizes interaction requirements, but adds the situational and contextual characters of real-world HATs [113]. This pillar is generally neglected in traditional frameworks and leads to the conceptualization of unrealistic configurations [133].

These frameworks and taxonomies provide valuable guidance. However, they do not fill the empirical knowledge gap from case studies dealing with implementing I4.0 technologies in work environments. These findings are essential to forming a solid theoretical and practical foundation for Industry 5.0 [31]. Also, the analytical layer is too coarse to fully entail the interaction space of real-world HATs [372]. Some authors have advocated the need to develop finer situated frameworks and design artifacts to fully address the requirements for designing effective HAT [54,62,63,65]. [63] introduced teaming interdependence to model joint

human-automation activity in a fine-grained manner. This notion of team interdependencies is characterized by three criteria : observability, predictability, and directability of each team member. The Interdependent Analysis (IA) Table operationalizes the design space to determine and fine-tune the interdependent relationships that predict HATs performance [61]. In light of these approaches to automation, the following section reviews existing industrial inspection knowledge and technical advances to automate this work.

6.2.2 Manual and Automation-Assisted Industrial Inspection

Industrial Inspection is a crucial step in any manufacturing process that aims to certify product's quality [109]. Standard operating procedures (SOPs) issue quality norms, types of surface anomalies expected (defects), and acceptance/rejection criteria [313]. Inspectors are responsible for assessing deviations from the defined standards by performing multi-sensory analysis on products [28]. According to several authors, inspection is a highly cognitive process that can be grouped into five stages. Visual search and decision-making are the most complex and error-prone (Table 1) [8, 313]. Both stages incorporate a substantial amount of knowledge (explicit, tacit), where inspectors' expertise determines the final performance of the process [8]. Although inspection appears procedural and linear, it has been characterized as "ill-structured work because there is no simple step-by-step procedure which will ensure success, and because there is usually no knowledge of task success available during the task" [317, p.2]. In other words, the process is highly situated, involving dynamic decisions in which the current and desired situation state is not completely defined. Two studies argued that inspectors are rational decision-makers who use economic variables to improve process outcomes [308, 326]. In a recent paper, we identified 37 decision-making variables shaping inspectors' work [28]. We concluded that automation could improve performance-related factors but should be approached cautiously because inspectors (1) occupy multiple roles in the broader decision-making ecosystem ; and (2) perform additional tasks to produce correct results that may not appear in SOPs.

Automated systems can increase efficiency, safety, and speed of the inspection process [319]. Their introduction is generally motivated by the desire to address the shortcomings of traditional inspection : speed-precision trade-off, expensiveness, human error, time required to train qualified inspectors [109, 308]. The combination of new generation sensors and image processing techniques enhances data quality and processing, traceability, reduces uncertainty, and enables multi-layer analysis in real-time [373, 374]. Their performances are high since they can detect up to 98% of defects with a false alarm rate of about 2% [8]. Despite these achievements, [109] presents some shortcomings of automated inspection systems. First, inspections

Task	Sub-Task Description	Type of skill	Cognitive functions
1. Set up	1.1 Routing inspection equipment, aids and parts	Manual/Cognitive	Memory
2. Present	2.1 Orient the item	Manual	-
3. Search	3.1 Search the item (visual, tactile and perceptual-motor)	Manual/Cognitive	Attention, perception, memory
	3.2 Detect the flaws	Cognitive	Detection, recognition, memory
4. Decide	4.1 Classify the flaws	Cognitive	Pattern recognition, classification, memory
	4.2 Decide about the item, comparison against quality standards	Cognitive	Judgement, classification, memory, sense-making
5. Respond	5.1 Dispatch the item	Manual	-
	5.2 Record item's information	Manual/Cognitive	Memory

systems support the Search phase of inspection (task 3, Table 1), and the more advanced ones can also classify defects (sub-task 4.1, Table 1). None of the reviewed systems support the decision phase. During this task, inspectors *process and make sense of data from multiple sources* to generate correct outcomes [109, p.61]. Second, these lab-developed technologies must be validated in real-world contexts to appraise their ecological validity, i.e., the fit between technology capabilities and work domain goals [109]. Discrepancies between technical and ecological validity generally hamper social aspects such as technology acceptance [69]. Finally, partial inspection automation implies a subordination of the technology to the operators [109]. The technology is expected to execute some tasks that inspectors previously carried out, and new ones will emerge from HAT [61]. Therefore, HATs must be designed and tested on real use-case scenarios during the development cycle [69].

6.3 Research Methodology

6.3.1 Case Background

Our research deals with designing and implementing a first-of-a-kind Cyber-Physical System (CPS) in the aircraft Maintenance, Repair & Overhaul domain. The CPS is expected to inspect and diagnose the condition of service-run components, while complying to Airworthiness Directives. Three aircraft components are candidates for the project : blades, shafts, and disks. The CPS must demonstrate the required capability on complex aircraft geometries. It should also integrate corresponding domain rules to provide operators with correct assessments. Currently, inspecting and sentencing a part is a labor-intensive work that relies heavily on the expertise of trained operators. This expertise is difficult to determine, extract and translate into an applicable set of rules for machine-based interpretation. Also, inspection criteria were formulated for human interpretation but require intensive programming

endeavors for each scenario. Ethical approval for this study was obtained from the Research Ethics Committee of Polytechnique Montreal (CER-2122-28-D). In addition, verbal informed consent was obtained from all subjects before the study.

6.3.2 Research Approach and Organization of the Paper

This paper is framed within the elaborated Action Design Research (eADR), a research paradigm that combines facets of Design Science Research (DSR) and Action Research (AR) [22]. Specifically, the eADR *must generate design knowledge that creates innovative artefacts and addresses an organisational need for intervention* [22, p.7]. The eADR structures the sequence of *intervention activities* and iterations that occur in real-world technology development project. The framework comprises four iterative cycles : *diagnosis, design, implementation, and evolution* [22]. Each of these cycle includes *intervention activities* of problem formulation (P), artifact creation (A), evaluation (E), reflection (R), and learning (L) that align with the cyclical nature of DSR project in real-world environments [336]. These intervention cycles generates design artifacts that supports the researcher-practitioner in (re)defining the current problem state, enrich the solution space, and define the steps needed to reach the desired solution state [22, 375]. The eADR formalized several entry points based on the research context, the project purpose, and the project timeline, as follows [22] :

- Problem-centered : understand and specify the research problem in order to outline the desired solution (solution space)
- Objective-centered : refine and enrich the solution space via the design knowledge generated to target design opportunities
- Development-centered : implement a desired solution that address the research problem and design objectives
- Observation-centered : observe and evaluate the artefact usage *in situ* in the application environment and propose improvements/evolutions if necessary

Following the structure of ADR [22], the following sections delineate the diagnosis and design cycles that enabled the transition from I4.0 to I5.0 in a highly innovative project (Figure 6.1). Section 6.4 exhibits how we diagnosed the problem and initial solution space to redefine a work-centric implementation strategy. Section 6.5 materializes the first design activity that demonstrates how we anticipated the capability gaps of the maturing technology through the *technology coverage* construct. Section 6.6 shows how we progressed from the human work situation to the human-automation work situation with the domain-specific design knowledge generated from the two previous cycles. Each section (cycle) is structured with a summary, the methodical considerations and the results obtained.

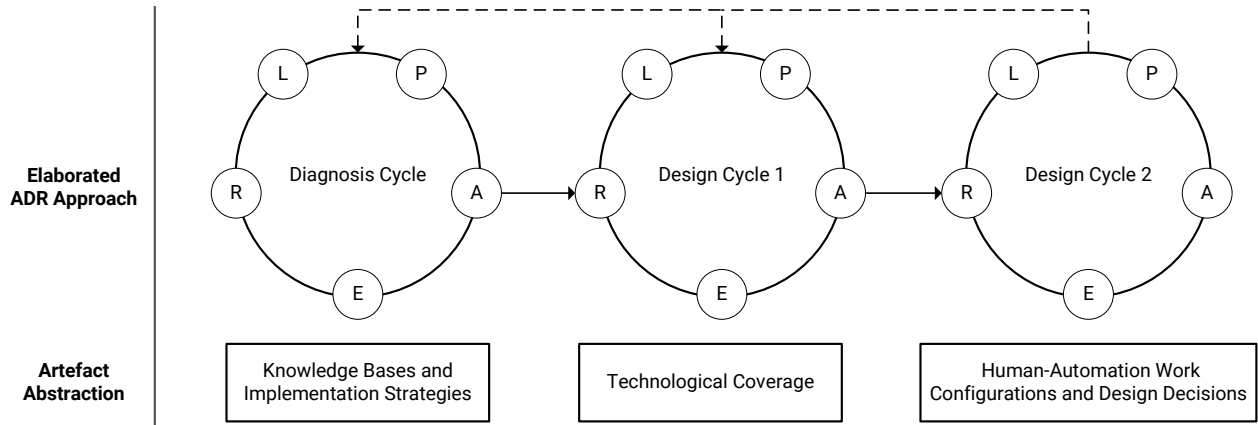


FIGURE 6.1 The Elaborated ADR cycles based on [22] and [23]

6.4 Diagnosis Cycle - Supplying the Knowledge Bases to Enrich the Solution Space

Summary

This cycle exhibits the investigation conducted to diagnose the problems with the current technology-driven path. Three elements were investigated to understand and refine the initial problem space :

1. Design-related elements : overall design objective and specific design objectives assigned to the stakeholders, project timeline and constraints, methods, technical capabilities or feasibility
2. Work-related elements : work domain parameters (people, roles, tasks, rules, procedures, tools) and end-users work activity
3. Literature review : industrial inspection (targeted work to be automated) and human factors in automation (methods, knowledge bases, constructs, models)

We diagnosed that automation alone is not suitable to conduct industrial inspection task-work in a safe, effective and resilient manners. As a solution space, we then proposed the Human-Automation Teamwork (HAT) paradigm as an alternative implementation strategy to better integrate the CPS into the current work domain.

6.4.1 Methods

Design-related inquiries (automation design)

We probe into researchers' and designers' motivations/concerns that justify the need to conduct concurrent human factors analyses. We started by reviewing the design documents produced by the designers that include the research proposal, the presentations prepared by stakeholders and the previous projects conducted. This helped us to understand the overall design objectives, and the specific design objectives assigned to each stakeholders at a finer granular level. Then we conducted open-ended interviews (N=2) with designers to understand previous implementation issues that justified the need for human factors analyses.

Work-related inquiries (industrial inspection)

We conducted field inquiries to comprehend how inspecting and diagnosing aircraft components is really performed in the given environment [16]. We relied on several data collection methods (observations, interviews, semi-experimentation) to obtain a micro and macro perspective of the work system. As inspectors are part of a broader ecosystem, we also examined how their work is interdependent with other relevant socio-technical actors. We collected data with twelve inspectors, seven operators, and ten managers/engineers that total 62 hours to get an overview of the work system and the role of inspectors. The knowledge gained from these research activities has fed into the operational environment and subject matter experts Domain-Specific Knowledge Bases (Figure 6.2).

Literature reviews and documentation analysis

We concurrently reviewed internal (application environment) and external databases (academic research engines). We examined the internal database to gather contextual information on work procedures, post description, overall process of industrial inspection. Regarding the external databases, we gather existing knowledge on scientific search engines (Compendex, Scopus, Web of Science, and Google Scholar). The goal was to review the available knowledge on industrial inspection in order to get a comprehensive picture of the challenges, tasks and general functioning of inspection. We also reviewed theoretical and empirical knowledge regarding the influence of automation on human activities and how to best integrates human factors in automation design. The knowledge gained from these review-based activities has fed into the Foundational and Domain-Specific Knowledge Bases (Figure 6.2).

6.4.2 Results

Understanding the Problem Space

Building on the eADR process, we first acknowledged that our point of entry was *objective-centred*. We explored the *design options based on project objectives* and generated design knowledge to support design orientations and decisions (domain-specific knowledge in Figure 6.2), i.e., what is feasible considering the project costs timelines and expected technological capabilities [22].

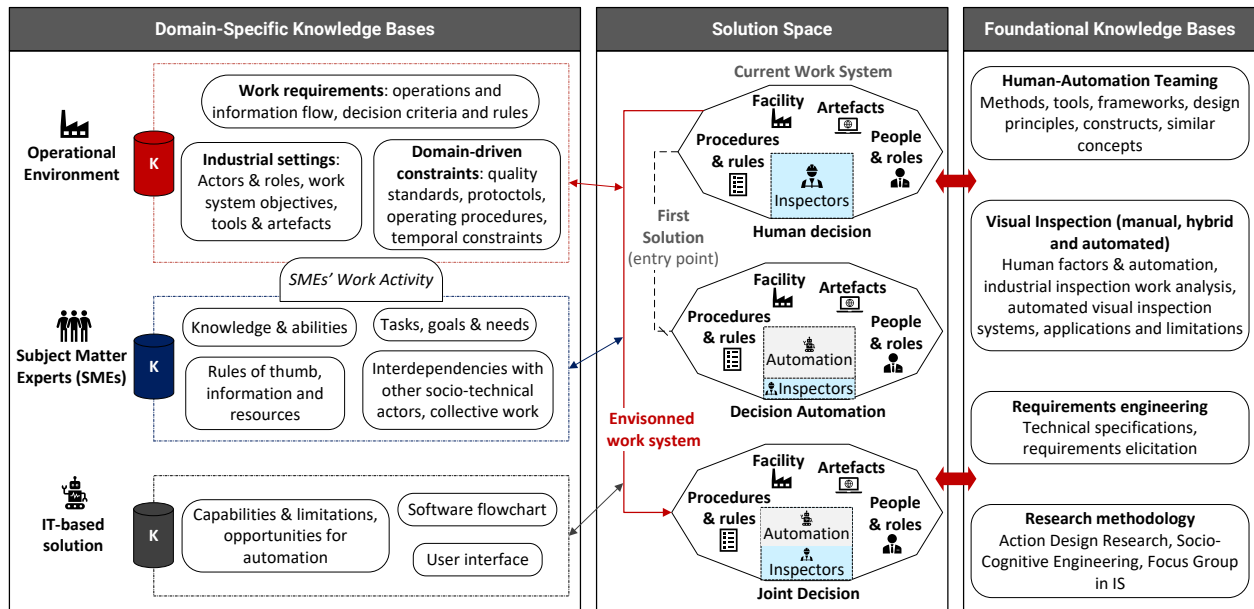


FIGURE 6.2 Knowledge bases that outline the solution space

Design-related inquiries revealed several things. First, the project follows a techno-centric trajectory to overcome the technical challenges of developing advanced hardware and software components, and effectively integrating these subsystems together. Second, the initial project's ambition was to fully automate the inspection process (*Decision Automation* or DA in the solution space column in Figure 6.2), that is detecting, classifying, sentencing and deciding on the service-run component condition. During a semi-structured interview with a design team member, he highlighted previous implementation issues with similar technology. The information asymmetry between the CPS outputs and users' expectations harmed technology acceptance. Not only were users unable to understand the CPS's rationale (e.g., black box), but their decision sometimes differed from the CPS, which generated trust issues. Design engineers needed to know how do inspectors make decisions in naturalistic settings in order to "reverse engineer" the process.

Work-related inquiries uncovered the complexity of industrial inspection. We began to wonder about the possibility of fully automating this knowledge-intensive work. We also noticed that inspectors' meaning-making and decision-making processes - the ones subject to automation - were not well documented in the current literature. We therefore examined and documented the practice of industrial inspection at a micro and macro level (Figure 6.3). We discovered that inspection is a complex socio-cognitive work regulated by institutional policies and airworthiness directives. Inspectors are at the center of a decision ecosystem, interacting with many artifacts (procedures, technologies, tools, rules) and actors to diagnose components' conditions correctly. From a cognitive viewpoint, they collect, process and interpret a lot of information from distributed computerized and non-computerized sources. Their work involves rich sense-making and decision-making processes to apply the relevant domain-specific criteria, rules and procedures. These are by nature highly context-dependent and ill-defined, which demands human-level interpretation (case-by-case application). Interested readers may find a thorough analysis of inspectors work in previously published papers [28, 376].

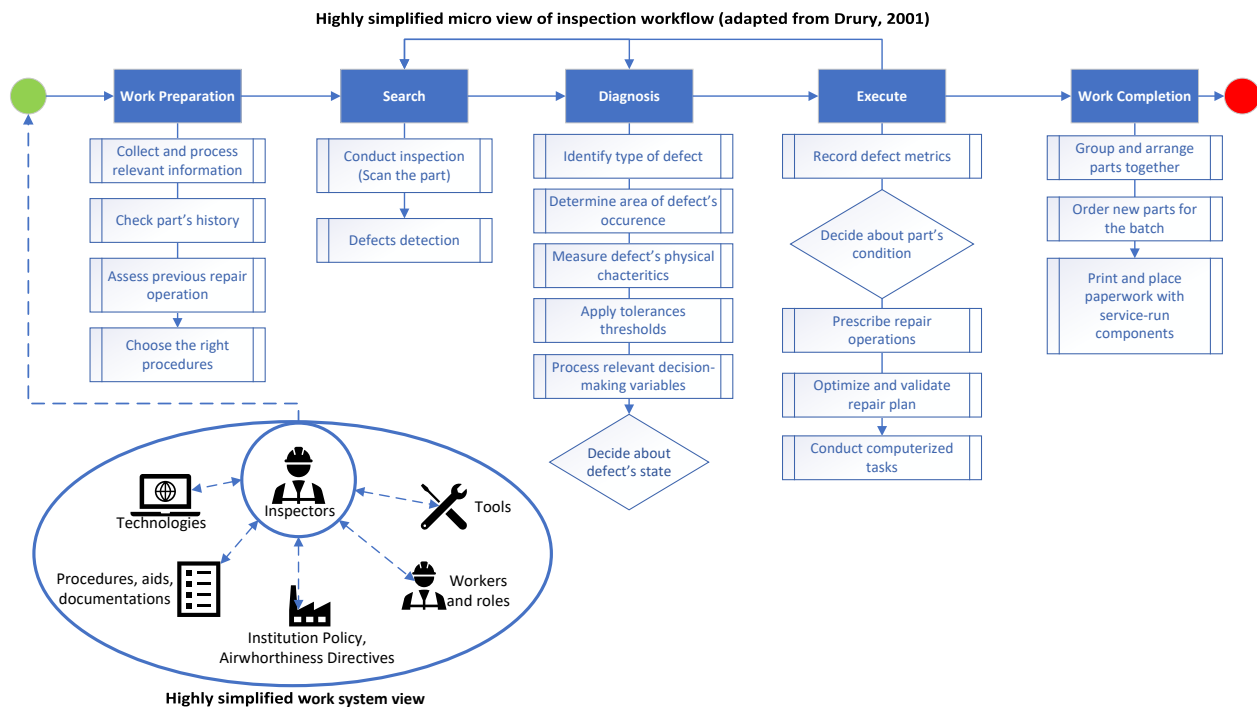


FIGURE 6.3 Simplified schematic description of inspection at a micro and work system views

Our literature review on industrial inspection and HF indicated that even cutting-edge automated solutions only support a tiny portion of inspectors' decision-making process. Thereby, the CPS is expected to complete some of the process tasks, in collaboration with inspectors to fulfill operational requirements. This form of joint human-automation work needs to be

established with contextual findings to organize machines' and operators' collaboration in the most effective way. From these findings, we continue to review the frameworks, methods and design principles to design human-automation work system design. We noticed that this relatively recent scientific field lacks actionable design methods and tools.

Exploring the Solution Space

Each data collection provided a critical review of the initial solution space, namely the development of an autonomous inspection solution. We explored the motivating factors that led to the DA solution. The CPS was conceptualised to enhance performance-related factors by reducing turn around time and provide process traceability. Previous system design cycles have also provided proof-of-concept of the CPS's capabilities to inspect service-run components. However, this initial solution was envisioned without a critical linkage and articulation of current work domain analyses. Given the situated complexity of industrial inspection (e.g., process many decision-making variables), we questioned the DA solution in autonomously conducting inspection process. Simultaneously, we documented the issues associated with techno-centric automation design on human work and investigated alternative implementation strategies that emphasizes both work domain parameters and technology-related factors (see Section 6.2.1).

It became apparent that DA was not suitable when we presented our ethnographic findings to designers. Introducing designers to the operational complexity of industrial inspection in detail allowed them to reflect on potential capability gaps. We then *evaluated* that fully automating inspection was neither feasible nor desirable. Automation alone cannot carry out the cognitive work requirements but can enhance inspectors' capabilities in automation-assisted scenarios. We also presented the Human-Automation Teaming design paradigm (*Joint Decision* or JD in Figure 6.2) as a solution to to overcome technical limitations and avoid unintended automation consequences. The rationale is that humans can benefit from machine computing and processing abilities. The next step consisted of *evaluating* the adequacy between the JD perspective, the inspectors' needs, and the overall project objectives. We held several formal and informal discussions with designers to *reflect* what this paradigm shift meant and plan the future design activities. Indeed, the descriptive findings on industrial inspection provided little insight into how HAT could jointly accomplish the inspection process. We needed formative design tools that link work requirements and technological capabilities to establish potential human-automation work configurations. The following section details the socio-technical artifacts developed to derive, share, and use work-centric data to define the CPS's functional requirements and compare work demand with technical

capabilities (*technological coverage*).

6.5 Design Cycle 1 - Technological Coverage

Summary

This section shows the first intervention cycle to reconfigure the initial work situation into a collaborative human-automation work situation. We started to derive 120 functional requirements from the analysis of inspection work. Then, sharing a common representation of the solution space with designers, we established what function the CPS could take on with respect to required capacities. We concluded that half of these functions could be fully or partially automated. Finally we compared the CPS flowchart with the work demands to highlight discrepancies, requiring additional work design endeavors to reconfigure machine and human participation in HAT.

6.5.1 Methods

Translation of work-centered data into functional specifications

The first step consisted of translating descriptive findings from work domain analyses into functional specifications to build a shared representation and design space with designers. Following systems engineering fashion [377], we derived functions that the CPS must perform in fully autonomous scenarios from the work-centered data collected. The formalized functions do not include those that are excluded from the engineering development plan. We decomposed each function into sub-functions to uncover the required knowledge, skills, and abilities to accomplish the work requirements. This decomposition is grounded in the *Work Activity* theory and thereby integrates the physical, cognitive, and social dimensions of human work [378]. We iterated inductive (data collection) and deductive (functional specifications) phases as the accumulation of inspection's work knowledge triggered new interrogations. Some functions shed light on missing elements for specific tasks and raised the need for subsequent analysis to fill the gap.

Elicitation of technological capabilities (Exploratory Focus Groups - EFG)

During four focus group, this phase consisted of qualitatively assessing the expected technological capabilities for the functions previously elicited. The participants were automation engineers and team leaders, totaling six people (including one member of our team). Following the guidelines proposed by [347], we developed a *questioning route* to guide the group's

discussion toward defining the functional capabilities and limitations of the technology to perform real-world inspection tasks. After welcoming and explaining the goal of the focus groups to the participants, we went through the list of functions, one by one, to determine its corresponding status :

1. Full automation possible (autonomous function)
2. Partial automation possible (hybrid function)
 - (a) Require manual data entry
 - (b) Require co-action with a human operator
 - (c) Require confirmation
3. No automation possible or desirable (human function)

Designers evaluated automation potentials based on planned hardware and software developments, project constraints (time and cost) and the technical capabilities of the system components (sensors, cameras, algorithms). In order to enrich the discussion, we explored the functions through different use case scenarios. After obtaining the technological capabilities, the *Technological Coverage* (TC) represents the gap between the functions that the CPS can perform completely (autonomous function) and partially (hybrid function), and the functions that it cannot perform (human function). This was calculated as follows :

$$\%TC = 100 * \frac{AutonomousFunctions + HybridFunctions}{TotalFunctions}$$

Analysis of the CPS flowchart and comparison with human workflow

This phase involved understanding and modeling the CPS's flowchart to better integrate it with human workflow and operational processes [369]. We conducted two semi-directed interviews with concurrent software demonstration with an automation engineer. These data collection sessions were recorded and transcribed, allowing us to model the software flowchart afterward. Finally, we compared the two sequences - human inspection and automated inspection - to identify the technological coverage, the additional technical development needed, and guide the human-automation work design. Then, we compiled and determined the technological coverage for each inspection decision-making variable (n=37) based on the CPS's capabilities, the work requirements, and the focus groups' outcomes. We also defined the ones that are likely to disappear (e.g., in the case of automation of functions) and those that are no longer relevant in the future situation.

6.5.2 Results

Functional Derivation and Elicitation of Technical Capabilities

We derived 120 functional requirements from the descriptive work-centered data obtained for each of the five grand inspection tasks : work preparation, search, diagnose, execute actions arising from the diagnosis, and work completion. We show an example of how we made such a derivation (Table 6.1). Appendix B shows an excerpt from the cross-functional work with designers that specifies for each function the associated technology coverage (TC) and its nature (autonomous, hybrid, human).

TABLEAU 6.1 Deriving functional requirements from inspectors' task

Task	"The inspector detects a nick in the top corner of the service-run component"
Functions derived	Function 1 : the system should detect the defects
	Function 2 : the system should classify the different types of defects
	Function 3 : the system should know the different areas of the service-run component
	Function 4 : the system should situate the defect's location

The TC offered by the CPS account for 45% of industrial inspection tasks (Table 6.2). Among this distribution, 26% of the tasks can be fully achieved by the CPS, and 19% are hybrid, where human intervention is required to fully accomplish the work demands and operational requirements. 61 out of 120 functions (51%) will not be automated in the planned development, meaning that human will continue to perform these functions. These ratios highlight the active participation of inspectors (TC=70%) in the future. Regarding the distribution of TC per inspection tasks, the *work preparation* and *work completion* steps will be entirely human, with one exception in the former (Table 6.3). Indeed, designers specified that the CPS is not programmed to collect, retrieve, and interpret instructional information from the environment. However, there are features to manually input the relevant data attached to the components. The *Search* phase is most automatable with 42% of TC.

Functions such as "Scan the part" and "Identify areas of the service-run component" are fully autonomous. However, the crucial function of "defect detection" is hybrid, because some defect patterns are difficult to perceive by computer vision. For example, certain defects located on the edges may be missed. Collaborative work with human operators is required to ensure the detection of all defects. The *Diagnose* and *Execute* steps are highly human-dominant with only 23% and 29% of TC respectively because they involve the processing of a large amount of contextual information from multiple sources. In addition, they are often written in natural languages that may be difficult to translate into machine-readable format,

TABLEAU 6.2 Technological coverage

Functions Covered	N	%
Yes	54	45%
Full	31	26%
Partial (Hybrid)	23	19%
No	61	51%
Definitive	41	34%
Temporary	20	17%
Non-Applicable	5	4%
Total	120	

TABLEAU 6.3 Distribution of function types by inspection tasks*.

Nature	Prep.		Search		Diagnose		Execute	
	n	%	n	%	n	%	n	%
Autonomous	1	6	13	42	12	23	5	29
Hybrid	2	11	10	32	10	20	1	6
Human	15	83	5	16	28	55	10	59
N/A	0	0	3	10	1	2	1	6

*We did not include the work completion stage in table 6.3 as it was fully human

making automation difficult. Finally, Inspectors must stay in the loop for aerospace safety and legislative reasons as machines cannot legally make the final decision.

Comparison of Human Inspection Workflow and CPS Flowchart

Comparing the CPS's flowchart with inspectors' work allowed us to gain a finer understanding of the technical capabilities and highlight the discrepancies between the two processes. Some tasks that human inspectors perform are not replicated by the CPS, leading to potential diagnosis mismatches (which caused implementation issues in past projects). The CPS replaces the human multi-sensory process by moving the service-run components under different cameras and sensors using its robotic arm. It then acquires several images and roll inspections algorithms to detect surface flaws (Figure 6.4 - upper part). The CPS rolls additional algorithms that generate contrast-based measurements to estimate the defect's physical dimensions from the images acquired. Then, the measures are compared with the tolerance thresholds provided in SOPs to establish a diagnosis (pass or fail). The CPS then scans each failed detection using robust 3D cameras to establish depth-based measurements and determine precisely if the defect is under the acceptance thresholds. However, the major gap between the human and automated workflows comes from the processing of decision-making variables (last task of the *diagnosis* - Figure 6.4). Inspectors process other decision-making variables (DMVs) than defect measurements only in their diagnosis. These variables influence the final decision and may be economic, material, procedural, legislative, or knowledge-based. Table 6.4 lists these DMVs with the associated technological coverage inferred from our analysis. The CPS fully covers 7 DMVs and partially covers 5 out of 37 DMVs (Table 6.4).

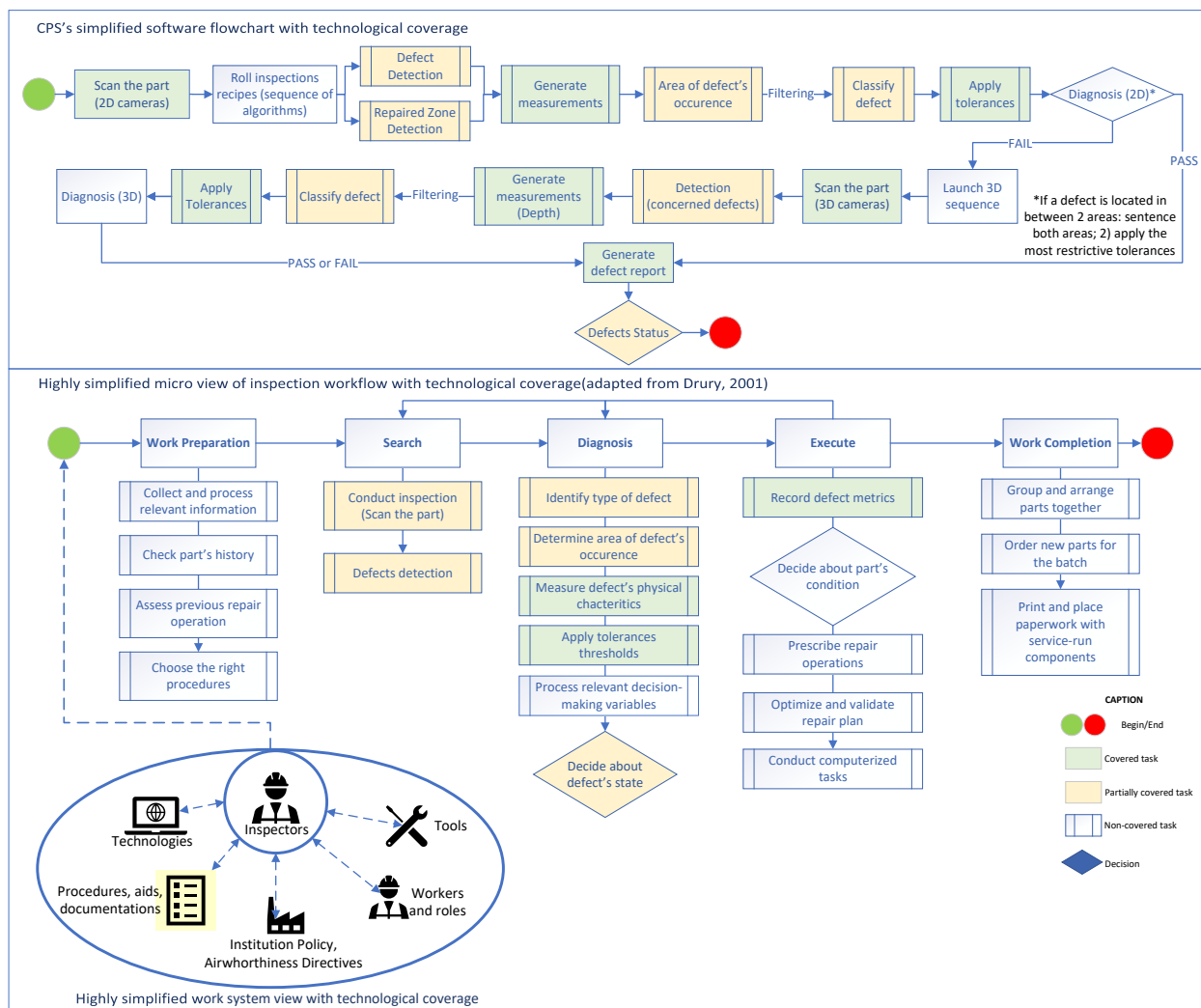


FIGURE 6.4 Comparison of human workflow and CPS flowchart with technological coverage

The CPS can display precise dimensional characteristics of the defects (DMV #1) and compare these measures with tolerance thresholds (apply tolerances). In the current process, measurements taking can be imprecise because measuring tools wear and human perceptive limitations (DMV #9). However, historical data cannot be tracked by the CPS (e.g. previously performed repair operations). Restoration of the surface where a defect appears removes base material. To avoid unsatisfactory effects on airworthiness, the OEM sets thresholds that limit the number of repairs allowed, the maximum amount of material removal, or prohibit the application of repairs in critical areas (DMVs # 4,5,6 and 7).

Tableau 6.4: Technological coverage of the decision-making criteria processed during diagnosis

#	Decision-making Variables	Techno. Coverage
1	Depth, width, length, circumference of a defect	Yes
2	Family of defect (defect classification)	Partially (Hybrid)
2.1	Harmful defect for airworthiness safety ("sharp" defect)	Non relevant anymore
3	Area of defect's occurrence	Partially (Hybrid)
3.1	Defect occurrence on critical area (attachment zone)	No
3.2	Defect occurrence on unregistered area ("grey area")	Partially (Hybrid)
3.3.1	Defect occurrence on repaired area	No
3.3.2	Defect occurrence adjacent to a repaired area	No
3.4	Defect in-between two areas	Yes
3.4.1	Diagnose each area with relevant tolerance	Yes
3.4.2	Apply the more restrictive criteria	Yes
3.5	Defect extension into an unauthorized area	No
4	Blending/dressing restrictions	No
5	Applicability of repair scheme	No
6	Repair scheme restrictions	No
6.1	Max applications reached for the scheme	No
6.2	Max applications reached for conjunctive scheme(s)	No
7	Additional instructions from local reference manuals	No
8	Optimization of the repair process	No
8.1	Defect removal by inspectors using sandpaper	Non relevant anymore
8.2	Defect removal by downstream repair operations	Non relevant anymore
8.2.1	Assigning defect to a nominal repair operation	No
8.2.2	Assigning defect to a non-nominal repair operation	No
9	Ambiguity in the process or No reasoning	Partially (Hybrid)
9.1	Reachable area(s)	Yes
9.2	Measurements tools wear	Non relevant anymore
9.3	Quality and perceptibility of a defect	Yes
9.4	Proximity with other defects	Yes
9.5	Physical characteristics borderline with tolerance threshold	Non relevant anymore
9.6	Unclear/non-existent instructions for defect's configuration	Partially (Hybrid)
10	Risk of bottle-necking the Material Review Board	No
11	Interdependencies with adjacent part(s)	No
12	Centralization of repair operations	Non relevant anymore

Continued on next page

Tableau 6.4: Technological coverage of the decision-making criteria processed during diagnosis
(Continued)

#	Decision-making Variables	Techno. Coverage
13	Number of batch parts affected	Non relevant anymore
14	Part's thickness	No
14.1	Maximal material removal allowed	No
14.2	Current material thickness	No

^a Techno. Coverage = Technological Coverage

Operators manually engrave the used repair scheme directly on the component and record the data in a resource planning software (ERP). In both cases, the CPS does not have the technical capabilities to recognize engraved numbers, access the ERP's data, assign them to a specific repair scheme and interpret whether or not a defect can be repaired. Thereby, human-in-the-loop will be essential to ensure the compliance with institution policy and air-worthiness directives. Figure 6.4 schematically compares the current inspection workflow with the associated technological coverage provided by the CPS. This visual representation shows that inspectors' roles will be important in all inspection tasks. This reverses the initial design assumptions where inspectors' participation was expected to be minor (*Decision Automation* in Figure 6.2). Also, understanding the software flowchart helped the Human Factors Team contextualize the support the CPS can provide at the individual and work system level (Figure 6.4). These results have led to a consensus on the importance of humans in the solution domain, yet the configurations of human-machine work situations remain unclear.

6.6 Design Cycle 2 - Human-Automation Work Configurations

Summary

This section exhibits how we progressed from the initial work situation to the new human-automation work situation with the design knowledge generated in the two previous cycles. We conducted an interdependence analysis to define possible HAT configurations, highlighted alternative possibilities, and assessed those configurations in a confirmatory focus group with designers. These focus groups pointed out short-term and long-term solutions.

6.6.1 Methods

Defining Human-Automation Teamwork Configurations (HAT)

We relied on the Interdependent Analysis (IA) methods to establish effective HAT configurations, considering technology-related and work domain factors [63]. The IA generates a solution space that allows design teams to explore the different joint human-automation work configurations alternatives. Particular attention is given to the *potential interdependent relationships that support one other throughout the activity* [372]. The IA Table (IAT) is a formative tool developed by [372] to model joint human-automation activity. We slightly modified the IAT to articulate the design knowledge obtained in the previous cycles with different human-automation work configurations in order to evaluate the possible alternatives to achieve the desired solution state.

Validating HAT Hypotheses (Confirmatory Focus Group - CFG)

The final design stage aimed to confirm whether current developments supported the human-automation work configurations through a confirmatory focus group (CFG) [347]. Five participants were invited to the CFG, including design engineers, process engineers, and researchers, for approximately 75 minutes. Before the CFG, we identified eight critical pathways from the Interdependent Analysis that may not be supported with current technical capabilities (*edge cases*). We also sent to the participants the IAT with popularized documentation to support their understanding of the interdependent theory and tools. After welcoming them and explaining the goal of the CFG, we presented the IAT and reviewed each critical pathways. Designers were asked to assess whether planned and additional developments could solve the issues raised. If not, we fostered open discussions between participants to find out alternative solutions to enable unsupported pathways. Our research team member facilitated, guided, and reoriented the discussions towards the accomplishment of the operational objectives (work-driven anchor).

6.6.2 Results

HAT configurations

Previous cycles have revealed the centrality of inspectors and this design phase involved defining how critical aspects of the work will be decomposed and reassembled in future HAT configurations. In the tasks' background of this paper, we have completed an IAT for the first four stages of aerospace industrial inspection : work preparation, search, diagnose, execute

and execute stages¹. Due to the size of the IAT, this subsection provides one excerpt for the work preparation phase (Figure 6.5). This phase comprises many information collection and processing operations that have a decisive impact on inspection outcomes. Care must be taken to ensure that all information processing steps are performed by either the inspectors or the CPS to avoid any potential errors or diagnosis gaps.

First, the 120 functions elicited during the previous cycles were aggregated into a set of 24 tasks and 56 sub-tasks, corresponding to the Joint Activity Graph (JAG). The JAG, shown in the left side of Figure 6.5, integrates (1) the work functions, (2) the required capabilities to execute them, (3) the operational requirements (e.g., institutional policies or quality criteria), and (4) the tasks that may appear in future HAT configurations. Section two of the IAT shows the teaming alternatives (TA) to complete the work functions, involving one performer (P*) and one supporter. In TA1, CPS performs the work function with human assistance; TA2 is the opposite. After determining TAs, the capabilities of each entity as a performer or supporter are appraised in the corresponding columns using a color-coding scheme (Table 6.5).

Joint Activity Graph (What)			Teaming Alternatives		Workflow Analysis (How)							Human-Automation Teamwork hypotheses and additional system requirements to support interdependencies
			TA1	TA2	Automation (CPS)			Human				
Tasks	Sub-task(s)	Operational Requirements & Required Capacities	P*	H	C	Database	Recipes (rules-based algorithms)	Cameras (2D/3D)	UI	Perception	Cognition	Action
I. Work Preparation												
I.2 Collect consumables	I.2.1 Collect tools and accessories	(1) Determine the tools and accessories to inspect the part										
I.3 Collect relevant documentation and information	I.3.1 Part information (Registration area)	(1) Read and interpret vibro-engraved characters on the part's (2) Manual data entry in the system's database						The CPS doesn't perform pattern-recognition on manual characters				
		(1) Identify the previous repair schemes applied on the part (2) Detect the corresponding polishing/machining marks (3) Assign the repairs (blend, polish) to the corresponding repair schemes (4) Identify the allowed numbers of repair operations (5) Evaluate the remaining number of times the repair schemes can be applied (6) Determine the possibility to further apply the repair scheme (7) Manual data entry in the system's database				(1.1) CPS The CPS is not connected to the ERP's databases	The CPS is not able to i) identify previous repair schemes; ii) assign the repairs performed with the corresponding schemes; iii) identify the remaining number of repair operations allowed	The CPS can detect some of the polishing marks from previous shop visit	(1.2) CPS	(1.2) Inspector Inspectors may have difficulty perceiving old polishing marks	(1.1) Inspector	
	I.3.2 Engine's history	SAP	(1) Determine the number of shop visits of the part				No access to SAP					
	I.3.4 SOPs	Engine Manual	(1) Select the correct version of Engine Manual (EM) based on the WIC issued date					(1.2) CPS		(1.3) CPS	(1.2) Inspector	
Not necessary for the Teaming Alternative 1, in Teaming Alternative 2, the human is the only viable option and conduct this taskwork as on the current manual process. CPS: know the areas of the part inspected and the tolerance threshold associated. Inspectors (1.1): manual input of the Serial Number and Part Number, as the system is not able to recognize vibro-engraved characters on the aircraft components. Envisioned Teaming Alternative 1 (1.1) Inspector: manually enter the previous repair scheme applied, the number of occurrences and indicate in a CAD the area of occurrence. Inspectors must perform in any case a pre-inspection to enter historical and contextual part's data into the CPS (1.1) CPS: programmed to understand how much repair is allowed for each registered part. Whenever a repair operation is required, the system display on-screen the remaining number of repairs authorized by area and type (1.2) CPS: shall then indicate the resting number of repair schemes applications (1.2) Inspector: perceives the remaining numbers of repair allowed and conducts the work requirements (2), (3); and (6) to improve reliability Teaming Alternative 2 Fully human and conducted by the human inspector as on the current manual process The CPS will not be connected to SAP. Fully human: As done on the current manual process Teaming Alternative 1 (1.2) CPS: chose the correct EM version based on the WIC date issued entered by the inspectors (1.3) CPS: shall then display the EM version selected for the batch/part in the part information interface (1.2) Inspector: confirm the correct selection of the EM version or change it Teaming Alternative 2 The human conducts this taskwork as on the current manual process												

FIGURE 6.5 Extract from the IA of the information gathering task including the upstream operations

In TA1, the CPS needs human assistance to retrieve contextual information on service-run components. The project's development objectives did not foresee the CPS being connected

1. It was not necessary to apply IA for the work completion stage insofar as this stage is entirely human-led.

TABLEAU 6.5 Color-coding schemes of IAT

Performer (P*)	Supporter
Perform the task independently	Assist the performer for efficiency enhancement
Independent but brittle reliability (soft constraint)	Assist the performer for reliability enhancement
Partial capability (hard constraint or hybrid function)	Provide additional capabilities to complete the work requirements
No capability to perform	No capability to support (independent operation)
Not applicable or feasible	

to internal databases or equipped with pattern-recognition mechanisms on manually written characters. As the CPS is not yet fully operational, we assume that the inspector will have a command input system to enter relevant contextual information (e.g., the previous repair performed). Section three of the IAT depicts and assess the potential joint human-automation workflow. The CPS (automation) is represented by several hardware and software elements (e.g., rule-based algorithms) presented as headings in the workflow section. Inspectors are modeled by their perceptual, cognitive, and execution abilities. The black dot indicates the role of a particular component in the joint activity. The black arrows connect each dot to map potential workflows if required capabilities are met. Otherwise, a red dot and a red arrow indicate that future development (for machines) or training (for humans) is needed to transit from one task to another. Finally, the color-coding scheme in the workflow section indicates the capabilities of the performers in the TA section. The text inside the boxes corresponds to the empirical design data collected regarding the human-technological capabilities. Regarding the potential workflows in Fig. 6.5, TA1 requires additional development to operationalize this pathway on software (rules-based algorithms) or hardware (cameras) components, as shown with the red dots and red arrows. If TA1 is selected, human involvement is expected to mitigate automation limitations, as shown by the horizontal pathways in the three information gathering sub-tasks. Even with inspectors-in-the-loop, TA1 does not have viable pathways. This work preparation phase will be predominantly human without any further development. TA2 shows that inspectors are capable of everything, but are not 100% reliable in detecting previous polishing marks. Inspectors can collect and process relevant information independently, but the machine's access to contextual information will benefit future work. The right-hand section of the IAT presents the different HAT hypotheses and compiles the requirements to enable interdependent joint work, i.e., determining the requirements to support human-automation collaboration on the work functions. Below the column, the action scenarios of each team member are formulated (with the relevant component) and linked to the corresponding workflow section box. For example, in the last line of Fig. 6.5, the box "recipes" of the workflow section is mentioned "(1.2) CPS" and the corresponding text appears

in the last section. To clarify, the text that appears in the workflow section refers to the capabilities of the team members (design knowledge), and their expected actions to accomplish the work functions appear in the human-automated teamwork section (prospective data).

The IA revealed several valuable insights. First, many pathways are implicitly assumed to be viable, implying that the CPS has the required abilities and knowledge to fully perform the work functions. Instead of being invisible, the missing elements to fulfill the function and adequately support the team members are readily apparent through TA, workflow analysis, and the additional system requirements columns. Second, the human-automation collaboration in the diagnosis phase will be difficult to orchestrate regarding the current development. The phase contains many hard constraints in TA1. In addition, having the CPS in a cage (robotic cell) and requiring inspectors to stop the machine to perform manual operations can make the process cumbersome and influence interaction patterns. These "edge cases" will be discussed in a focus group to select the most appropriate design actions.

Design decisions in the Confirmatory Focus Group (CFG)

The IAT provided a roadmap of HAT configurations to meet operational requirements while uncovering potential unsupported teaming pathways and capability gaps (edge cases). The focus group aimed to confirm the CPS's capability in executing the work functions. However, it led to exploratory discussions to determine short-term and long-term solutions for unsupported pathways. The focus group provided rich insights summarized in Table 6.6 and detailed in the following.

First, one out of the eight critical pathways is supported with current development, i.e., it did not require any additional design effort or solutions. The other pathways were partially supported or non-supported and required design solutions. The solutions encompass both technology-related (e.g., additional developments) and work-related aspects (e.g., human-automation work redesign). Second, work-related solutions were proposed to mitigate the CPS capability gaps in Functions I.3 "collect relevant information and documentation"; II.1 "Defect detection"; III.1 "Identify the type of defects" and III.2 "Determine the area of defect occurrence" (Table 6.6). Inspectors will continue to perform the extraction and processing of multi-format data (e.g., vibro-engraved characters on aircraft components) since the system was not designed to have these capabilities. They will be provided with input commands to enter the values of some (but not all) relevant decision-making criteria. Since these elements strongly influence the decision making process, the CFG confirmed the need to keep it human in the short term. The same reasoning applies to functions III.1 and III.2, namely "identify the type of defects" and "determine the area of defects' occurrence." After the automated

inspection, inspectors will need to perform these cognitive operations to ensure that the final decision is correct. This may result in a localized inspection and a change in diagnosis. Third, we have not found satisfactory short-term solutions to enable a feasible path for sub-function I.6.3. The CPS is configured with the latest version of the SOPs. Inspectors may choose a different version under natural working conditions, depending on when the customer request was issued. This limitation could affect the CPS's reliability, resulting in incorrect output. Similarly, we informed designers that CPS displays defect dimensions with a unit of measurement unfamiliar to inspectors' mental models for function III.3. Forth, long-term solutions evaluated how the CPS's boundaries could be extended by adding new functionalities or interactive mechanisms. For Function I.6, discussions suggested that connecting the CPS to the internal databases would reduce manual data entry (and human workload), keeping the CPS up to date with new procedures, thus avoiding manual updating by technical staff members. Additionally, internal databases contain previous aircraft components' reports, i.e., the repair operations already applied. Long-term actions regarding the domain parameters were also suggested. Domain engineers submitted the idea of grouping defect classes into high-level classes.

Tableau 6.6: Design decisions made in CFG for critical functions (*edge cases*)

Function	Sub-function	Supp.	Design Decisions
I.6 Collect relevant information and documentation	I.6.1 Part information (registration area)	No	<u>Short term</u> : data entry and verification by inspectors. If necessary, they can override the decision of the CPS if a command input has not been provided. <u>Long term</u> : Machine learning to retrieve the corresponding data from a local Excel file or the ERP.
	I.6.3 Work Instruction (WIC) : client's request determining issue selection (essential)	No	The latest recipe (rules-based algorithms) is selected by default. <u>Long term</u> : first, the CPS needs to be connected to the internal database to retrieve the client-oriented data that specify the correct SOPs version to use. Additional development would be required to link each recipe to the corresponding SOPs. Then, inspectors can change the SOPs via an interface, if necessary.
	I.6.5 Effectivity list : indicates the possibility of carrying out repairs on the part (essential)	No	The inspector continues to validate if the P/N is well covered by the effectivity list (repair scheme) before entering the part in the CPS. <u>Long term</u> : possibility to match this information with huge algorithmic development. Nice to have but not a priority.

Continued on next page

Tableau 6.6: Design decisions made in CFG for critical functions (*edge cases*) (Continued)

Function	Sub-function	Supp.	Design Decisions
II.1 Defect detection	II.1.1 Detection of all defect types	No	<u>Short term</u> : Inspectors should recheck areas and defect configurations for which the CPS has shown limited detection capabilities. <u>Long term</u> : the addition of a "ring light" in the inspection cell would improve detection performance. That said, human verification is strongly suggested to validate the system's detections, at least initially.
III.1 Identify the type of defect	III.1.1 Differentiate two defects of the same family	No	<u>Short term</u> : inspectors review the CPS report and determine if a more refined classification is required for defects in the same family. <u>Long term 1</u> : create an alert and add an adjustment interface <u>Long term 2</u> : ask OEM to remove defect type differentiation
III.2 Determine the area of defect occurrence	III.2.2. Interpret and apply decision-making variables for the area of defect occurrence	No	<u>Short term</u> : inspectors shall determine from the CPS report whether a defect is located in an unacceptable area <u>Long term</u> : Configure the system to specify that a defect appears in an undesirable area.
	III.2.3 Interpret and apply decision-making variables for defect in-between two areas	Yes	Tolerances will be applied on both areas, and the CPS will apply the strictest tolerance. Note that critical areas of the part have been slightly enlarged in the CPS representation to be safer and ensure their coverage.
III.3 Measures defect's dimensions	Subtask : Displaying Proper Units of Measure for Inspectors	No	<u>Short term</u> : the dimensional characteristics of the defects are displayed in millimeters (mm) and pixels (px). The unit of measurement will be changed to display the results in mm and inches (in) to fit with inspectors' mental model.

^a Supp. = Supported

This section exhibited the last intervention-oriented activities that actualized the switch to a work-driven pathway. Building on the domain-specific knowledge accumulated (human-technical capabilities and work domain parameters), we defined HAT configurations that meet operational requirements and work demands. Additionally, we provided design directions for critical pathways that may not be feasible in the solution domain. The following section discusses this paper's theoretical, practical, and methodological implications and future research avenues.

6.7 Discussion and Conclusion

This action design research provides theoretical, empirical, and artefactual contributions [200] on the process of transitioning from a technology-driven pathway (Industry 4.0) to a work-driven pathway (Industry 5.0) in highly innovative projects. The four contributions of this work are discussed below, along with implications, limitations, and avenues for future research.

Work-Centered Approaches for Industry 5.0. Certain authors have argued that both a detailed understanding of the problem space and a *critical linkage* with the solution space is essential to ensure the fitness of the design solution in the application domain [13]. This research makes theoretical and empirical contributions to this claim by advocating a work-centered design approach for Industry 5.0 (I5.0). Previous studies have explained the benefits of a human-centric approach to Industry 4.0 (I4.0) from a theoretical standpoint. This work conceptualized and operationalized an I5.0 work-driven pathway that explicitly articulated domain-specific elements (e.g., the end user’s work activity) with design-related elements (e.g., technological capabilities). Establishing a critical linkage among these two sources of knowledge was necessary to yield ecological design solutions and cautious implementation of automation [69]. To our knowledge, this is the first study to derive work-centric data to inductively assess the capabilities of automation to meet operational requirements during the system development phases. Our method has similarities with [379] that aims to determine system requirements from field studies to envision future human-automation work configurations for cybersecurity. However, we utilized field data differently as the technology had already been selected and partially developed when we arrived in the project. Instead of identifying system requirements for future development [379, 380], we anticipated potential capability gaps of the maturing technology in autonomously fulfilling operational objectives by comparing human work with machine capabilities.

Quantification of Automatibility. The quantification obtained from *technology coverage* critically nuances the area of research that predicts the substitution of human labor by machines [371]. Tenants of this research stream estimated that around 47% of current occupations are likely to be automated in the next decade using an occupation-based approach (e.g., telemarketers, sports referees, cashiers). These results have been reduced from 47% to 9% of potential job automation by finer task-based approaches [381]. Our results suggest that this percentage can be further reduced by instrumenting and adopting a scope of analysis closer to operational realities. These estimates are made based on theoretical tasks without

any operational anchor, i.e., without an appreciation of the complexity and variability of operations in work environments [157]. In our research context, the *Search* tasks were initially envisioned to be fully autonomous before a thorough understanding of how the actual inspection is done and an appreciation of work domain complexities. Then, the technology coverage revealed that human inspectors will still occupy a primary role in completing this phase, i.e., 42% of technology coverage instead of 100% (and 32% oh hybrid tasks). The implementation of new technologies in workplaces modifies, *substitutes, or complements specific tasks rather than automating entire occupations* [381]. Therefore, we contend that the design must focus on how humans and automation will operate and evolve together as a team in the given operational environment, which is discussed in the following subsection.

Human-Automation Work Reconfigurations. This research made artefactual contributions to the interdependent analysis (IA) tool proposed by [?]. It was unclear how past HAT studies used domain-specific knowledge to redefine joint work situations. Considering the influence of domain-related factors in how they shape, constrain or favor the execution of work, it seemed crucial to integrate these elements in the design of human-automation work situations. For example, compliance with aircraft regulations and ethical concerns may prevent the automation of specific tasks even with adequate technological capabilities [382]. Our study extends the current scope of use of IA by showing a method for incorporating domain-specific knowledge and design knowledge into the IA table. This offers a solution space that links the current and envisioned domains to ensure that 1) the work’s critical elements are covered, decomposed, and reassembled in joint work configurations; and 2) that empirical knowledge about technological capabilities is taken into account when designing joint work situations. The improvements needed to achieve the desired end state are identified sequentially and linked to necessary remedial actions in our case study. These improvements can concern technological developments, organizational design, or training needs. Understanding the technological capabilities and limitations helped anticipate the respective role of inspectors and automation in the solution domain, which may influence perceived trust and technology adoption [53]. This provided detailed data on how the technology works (i.e., what it can and cannot do) and what information should be communicated to feed the inspectors’ mental model. Thus, this article is consistent with studies that advocate relying on team interdependencies to determine the information needs to maintain a shared mental model in human-automation teams [61].

Dynamics in Co-design Spaces. This research also contributes to a better understanding of cross-functional dynamics in Industry 4.0/Industry 5.0 projects, especially regarding the

collaboration between Human Factors Specialists and Design Engineers. This exhibits rare findings from real-world projects that are required to generate a foundation knowledge base for I5.0 [31]. Many authors have discussed the difficulty encountered by HF&E specialists when it comes to integrating work-centered data during the system design cycle [62, 112]. Our findings indicate a possible point of convergence by making design artifacts a common work-space that articulates the contributions of each discipline to reach the desired end-use. Indeed, one of the main challenges raised within cross-functional design teams concerns the level of *AI literacy*² of each individual. Individuals with little or no technical knowledge of AI are less likely to inject relevant design elements during the technology development cycle [70]. The functional-operational anchor of the *technology coverage* construct is a step forward in accommodating the required ecosystem of stakeholders with diverse AI literacies in the design process. This socio-technical artifact reorients the design focus towards the work functions supported by the technology in a language easily understood by stakeholders from different backgrounds. In addition, structural discussion around the technology's components is limited in terms of directions provided for further development. As the development progresses, the discussion needs to be enriched by pieces of evidence that demonstrate how the technology will fit in the future operational environment [70]. Autonomous functions were contextualized to highlight machines' contributions to the desired solution state. In this way, developers gained a situated understanding of their solution to meet business requirements, and designers/users better understood the technical capabilities and limitations. This reflects recent work by [70] on matching AI system capabilities to situated business context and end-use. This common grounding provides additional evidence of boundary objects' abilities to shape technology development in interdisciplinary team [7, 279].

Managerial implications. Our study has important managerial implications for firms that are pursuing digital transformation in industrial settings. First, the results of this study emphasize the need to capture the complexity and variability of operations before beginning automation design. This corresponds to the first step "*in situ* work analysis" of the Figure 6.6. The tacit and collaborative dimensions of work does not appear in operating procedures. Simplifying the work in automation design can alter the task-technology fit and cause unexpected consequences on system performance [384]. Second, our results suggest that it is important for firms interested in implementing I4.0 technologies to follow a deliberate analytical process in which the expected technological capabilities are embedded within an operational perspective. We suggest relying on work-driven pathways to inductively assess technical capabilities early in the design process. To do so, managers and designers may

2. "Core competencies for knowing, understanding, using, applying, evaluating, and creating AI" [383]

adopt the functional-operational anchor presented in this paper and conceptualized in step 2 "work-driven specifications" of Figure 6.6. This diagram summarizes the steps to articulate knowledge from the current work domain *in a way that is relatable to yield effective design solutions* for the envisioned domain [13]. Finally, as "No AI is an island" [6], our results suggest adopting a methodical and incremental approach to anticipate, during the development cycle, the changes that automation will generate on work practices. In other words, redesigning work situations to integrate humans and automation in teaming logic in regards with operational requirements, work demands and human-automation capabilities.

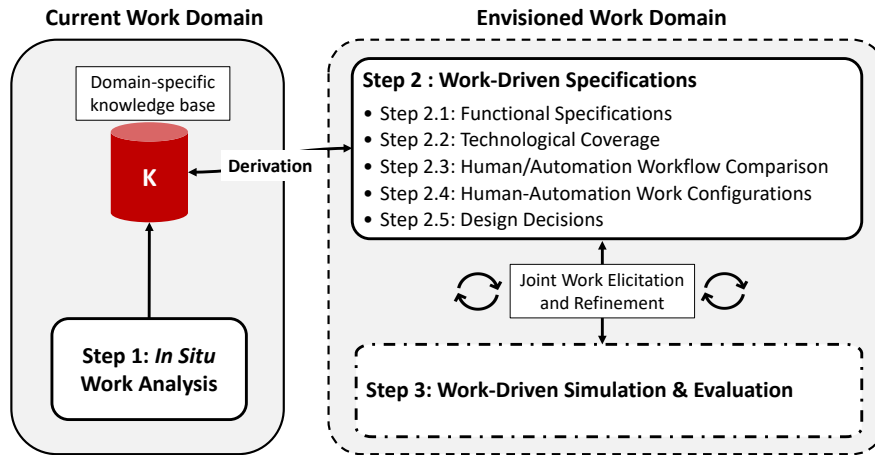


FIGURE 6.6 Work-driven anchor for human-automation work configurations

Limitations, avenues for future research and conclusion. This study has several limitations that can be addressed in future research. First, we cannot claim that the industrial inspection practice in our case study is representative of all practices in Canada and OECD countries. However, because performance is context-dependent, we argue that a work-driven pathway to automation can reveal the complex and variable nature of operations in a given environment and mitigate unintended consequences of technological solutioneering. Future studies should explore whether the work-driven pathway utilized in this paper can be extended to digital transformation projects in other safety-critical domains such as healthcare or defense. Second, a comparative analysis of job automation forecasts should be undertaken using a generic task model and a specific task model to confirm the discrepancies observed by the operational anchor adopted in this study. Although we suggest that this phenomenon is enhanced by operational anchoring, further studies need to confirm this gap by using technology coverage or similar methods. This will reinforce better the need for studying changes in work situations, not just the degree of "machine substitution". Finally, we are aware of the importance of evaluating the design concepts defined in step 2 (Figure 6.6). To that end, our

future work will consist of "testing" our hypotheses through semi-experimental settings. We plan to run work-driven simulations to elicit the joint work, especially to generate insights on fuzzy or presumed complex points (e.g., hybrid tasks with high interdependencies). We expect to reveal emerging behaviors that could not be anticipated in advance, which will require refinement of the human-automation working configurations (Figure 6.6). However, we do not elaborate on the metrics or the methods that are best suited to extract relevant insights from a work-driven perspective.

To conclude, the transition from I4.0 to I5.0 is driven by the realization that human-machine coexistence has more advantages than process automation in work environments. In the I5.0 perspective, machines would be assigned to repetitive tasks, and humans would perform value-added tasks that involve creativity and critical thinking. Our action design research revealed that it is not black and white when intelligent systems are developed and integrated into operational processes alongside humans. This paper demonstrated and discussed the benefits of an operational anchor (work-driven pathway) when digitizing work situations to ensure that the envisioned human-automation systems cover the critical aspects of work as development progresses while fully leveraging the potential of technological innovation. Finally, we provided avenues for future research on I5.0, highlighting the need to develop integrated frameworks that systematically link operational dynamics to the technology development cycle.

CHAPITRE 7 ARTICLE 3 : AN EXPLANATION SPACE TO ALIGN USER STUDIES WITH THE TECHNICAL DEVELOPMENT OF EXPLAINABLE AI

Cet article a été publié dans le journal *AI & Society* en date du 26 juillet 2022. doi : 10.1007 / s00146-022-01536-6¹.

Cabour, G. (Polytechnique Montréal), Morales, A. (Polytechnique Montréal), Ledoux, É. (UQAM), Bassetto, S. (Polytechnique Montréal).

Abstract

Providing meaningful and actionable explanations for end-users is a situated problem requiring the intersection of multiple disciplines to address social, operational, and technical challenges. However, the explainable artificial intelligence community has not commonly adopted or created tangible design tools that allow interdisciplinary work to develop reliable AI-powered solutions. This paper proposes a formative architecture that defines the explanation space from a user-inspired perspective. The architecture comprises five intertwined components to outline explanation requirements for a task : (1) the end-users' mental models, (2) the end-users' cognitive process, (3) the user interface, (4) the human-explainer agent, and (5) the agent process. We first define each component of the architecture. Then we present the Abstracted Explanation Space, a modeling tool that aggregates the architecture's components to support designers in systematically aligning explanations with end-users' work practices, needs, and goals. It guides the specifications of what needs to be explained (content : end-users' mental model), why this explanation is necessary (context : end-users' cognitive process), to delimit how to explain it (format : human-explainer agent and user interface), and when the explanations should be given. We then exemplify the tool's use in an ongoing case study in the aircraft maintenance domain. Finally, we discuss possible contributions of the tool, known limitations or areas for improvement, and future work to be done.

Keywords - Explainable AI; User-Centered Design; Interdisciplinary Study; Human-AI Teaming

1. **Acknowledgements.** Reproduced with permission from Springer Nature : *AI & Society*. Cabour, G., Morales-Forero, A., Ledoux, É. et al. An explanation space to align user studies with the technical development of Explainable AI. *AI & Soc* (2022). doi.org/10.1007/s00146-022-01536-6. Licence number : 5411651263578 (oct. 2022).

7.1 Introduction

Up to now, systems powered by artificial intelligence (AI) have been driven primarily by technical aspects and considerations. However, as computer systems are increasingly integrated into work environments, new forms of Human-AI collaboration are emerging. Achieving business goals in partnership with artificial agents raises new social, technical, and operational challenges [69]. The transparency of AI models is a challenge that is attracting increasing attention from the scientific community. Enabling Human-AI collaborative capabilities requires an understanding of automation's inner workings [385]. A subfield of Safe AI – eXplainable AI (XAI) – is pursuing this objective. This paradigm makes complex machine reasoning interpretable for human beings to avoid issues arising from blind decision-making [51, 386]. Effective communication of the decisions and actions taken by AI is a prerequisite for allowing joint task accomplishment by Human-AI teams [61]. Some authors have argued that an explanation is a situated interaction between users and the AI system rather than a property of statements :

"What counts as an explanation depends on what the user needs, what knowledge the user already has, and especially the user's goals. This leads to a consideration of function and context of the AI system (software, algorithm, tool). That is, why does a given user need an explanation?" [220, p.3]

Following in the footsteps of interaction design, providing users with meaningful explanations encompasses many human, cultural, and organizational context-dependent factors [13, 387]. Consequently, designing explanations is a multifaceted endeavor that integrates technical (XAI capabilities, model selection), human (users' needs, goals, and information-processing abilities), and sociotechnical (regulations, rules, procedures, and actors involved) perspectives [69, 388]. Many researchers have proposed a complete list of requirements for the technical aspects of XAI, such as delivering human-readable output [51, 389]. While these criteria are essential prerequisites, they do not guarantee that the explanations will align with users' goals, needs, and operating contexts. Only task-relevant information should be disclosed to users to avoid placing them in a state of cognitive overload. What is missing from the current literature is an integrated framework that links user studies to XAI technical development, keeping people at the center of the process of designing and evaluating explanations [390]. This paper proposes a user-inspired formative guideline that supports the design of explanations to address the gap mentioned above. We have identified five interrelated dimensions that constitute the explanation space. These dimensions support a user-centered view to design tailored explanations by linking users' needs with XAI's technical capabilities and possibilities. We illustrate the use of the framework in an ongoing case study of XAI development in

the field of aviation maintenance. This paper is organized as follows. We begin by providing a concise critical overview of current XAI frameworks and methods for studying users in the wild. We then present our formative framework, describing its features. Next, we exemplify how we are currently applying this framework in an industrial case study. Finally, we discuss practical benefits, limitations, and known areas for improvement.

7.2 Background and Motivations

The literature on Explainable AI is expanding rapidly. Here, we will briefly review the most relevant work for this project.

7.2.1 Why Explain ?

The incremental implementation of AI in the workplace will result in more and more human-AI interactions [391]. Technological capabilities now support human performance in high-level cognitive tasks : decision-making, sense-making, planning, etc. One of the main components for supporting human performance – and simultaneously the multifaceted concept of trust – is the intelligibility of a system’s actions, reasoning, and potential mistakes [392, 393]. This challenge is not new, as previous studies on expert systems revealed the issues associated with the opacity of a system’s reasoning [386]. Among them, problems related to the interpretability of actions, information processing, and decision choices resulted in decreased performance, misuse, and rejection of the technology by the users [68, 394, 395]. Opacity engenders uncertainty, disturbing the execution of the process tasks for which the expert system was implemented [68, 396]. The problems encountered during an expert system’s design are even more topical for new AI-powered solutions, since new machine learning (ML) solutions, such as deep neural networks, are even less understandable and more opaque than IF-THEN rules [13, 397]. In addition, AI-based solutions are being implemented in safety-critical domains, such as healthcare and aviation² [398, 399].

Deep Learning has revolutionized the technological industry, generating algorithms that have surpassed the human precision level in some cases [400]. These algorithms are generally composed of recursive combinations of hundreds of non-linear functions that make them powerful but incomprehensible. Adopting these technologies in contexts such as justice, transport, and healthcare has harmed society [401]. The decision mechanisms of high-performance ML models can be based on hidden spurious correlations [402], leading users to make mistakes. XAI would help users to judge the decisions made by an automated system, allowing them to

2. <https://air.nl>

understand and prevent misuses of their results in different contexts. For instance, understandable decisions would enable physicians to correct decisions made by an AI system [403] and prevent a false diagnosis; interpretability is needed because military decision-makers must be able to justify their decisions [404]; judges or policymakers need to refine, criticize and trust in their decisions [405]; explainable systems would help inspectors analyze aircraft components; driverless cars would provide users with helpful information to make decisions when human common sense is required. Therefore, XAI is becoming essential for some private companies and officially mandatory in several countries : consider the European Ethics Guidelines for Trustworthy AI [406], The Canadian Guiding Principles for effective and ethical use of AI³, and the OECD Principles on AI [407].

In addition to the above-mentioned reasons, XAI would allow users to find adversarial examples. An observation that can cause a classifier to err is known as an adverse observation. Finding adversarial examples is essential for the safety of intelligent critical systems. Although there are methods for automatically generating adversarial examples [408], this is still a growing research field. Anomalies, novelties, rare events, or outliers are often challenging to find, especially if they are not in the models' training data set ; some anomaly types are unknown [409]. Understanding these systems' mechanisms can allow one to find weak point settings and make their algorithms more robust in a real-world context [410, 411].

7.2.2 What to Explain and How

XAI aims to develop methods that can explain their own decisions or other AI models' decisions. XAI approaches might be either (1) *inherently interpretable models* or (2) *post hoc methods*. Inherently interpretable models (such as regression models, logistic models, Bayesian models, or decision trees) have an understandable architecture that makes them, to some extent, human-interpretable. Conversely, post hoc methods are applied after the black box model has been trained. Some of those methods might require full or partial access to the internal black box mechanism, while others require only query access (outputs from specific inputs).

Although inherently interpretable models have been used in contexts such as health [412] and education [413], more complex models outperform them. These interpretable models can provide more faithful interpretations [414]; nevertheless, post hoc methods, especially agnostic approaches, might be more in line with the unbridled development of AI technologies. Agnostic explainers belong to a family of post hoc methods that only requires query access

3. <https://www.canada.ca/en/government/system/digital-government/digital-government-innovations/responsible-use-ai.html>

to the black box, such as SHAP [415], LIME [416], G-REX [417], or ASTRID [418]. They are attractive since they ignore the underlying structure of the target model, allowing a broader spectrum of applications. In some cases, disclosing the system’s inner mechanism can make it vulnerable to attacks or gamification [419]. System gamification can be helpful in certain circumstances [420], but it is counterproductive in others [421].

Nevertheless, before considering how explainability can be obtained, a careful examination of user needs, and context should inform what must be explained. The answer to this question depends on both context-dependent and context-independent criteria : an explanation may focus on understanding the system’s reasoning process (context-independent) or a particular decision (context-dependent). [422] distinguish these two types of focus as *global* (model of system reasoning and learning) and *local* (justification). Justifying a decision is not always necessary and can be guided by eliciting end-users’ needs and decision-making context [51,423]. For instance, [423] formalized four significant factors that drive explanation requirements and personalization. They include (1) users’ goals ; (2) their cognitive behavior (how people process information and make decisions) ; (3) the criticality or importance of the decision ; and (4) compliance with AI regulations. [51] make similar arguments and add other explanation requirements such as time constraints. Indeed, the explanations required may differ at different points in the process. [51] argue that effective XAI systems that help users achieve their goals must follow human-centered design principles. User-based research can build on knowledge that provides guidelines for defining local and global explanation requirements : Is the output sensible and validated by users ? What information do the users need to know to fulfill their work requirements ? How did the model make such a prediction ?

In addition to a *local* and *global* focus, the format of explanations can also be contrastive or counterfactual. These kinds of explanations are similar and are based on examples of explanations where the user may interact, to some extent, with the machine ; in other words, there may be complete user-machine communication. The user can access different examples, decide which might be the most reasonable one, or wonder why the other answer was not produced ? What would be the result if something changed in the model or the input ? This kind of interaction with the system might improve its perceived safety ; the user experience might support system accuracy. Moreover, this explanation space is defined for the actors’ requirements, so the actors are the ones to decide what questions have to be answered [424]. Therefore, all the actors’ roles, needs, and knowledge must be considered in designing explainable intelligent systems.

User-friendly interfaces must also be provided for the system. The system’s functionality may depend on how it communicates with the user [424]. Explanations can be visual, textual, or

more complex, and the type of explanation depends on the users and their context. While some users require partial explanations focusing on relevant features, others may require a complete portrait of features and the reasoning behind a decision [397, 423]. Moreover, some critical systems might also be required to provide specific explanations to official regulatory agencies, so their mandates must also be fulfilled.

7.2.3 Inferring Explanatory Needs through User Studies

Linking user research to XAI calibration is critical for providing relevant local and global explanations to end-users⁴. Only a few publications have tackled this issue, and there is currently a serious delay in obtaining and using end-users' insights in the design of XAI systems [51, 423, 425]. In this section, we present relevant approaches to inferring end-user needs through ethnographic studies.

Ethnographic studies aim to understand how people behave in real-world contexts and why they behave that way [231, 426]. Ethnographers immerse themselves in the users' natural environment (*in the wild*) to gain an in-depth understanding of their actions, intentions, and decisions [426]. The purpose of doing this is generally design-oriented, meaning that design ethnographers are conducting field research to support a higher-level motive related to the design of artifacts or work, rather than doing ethnography *per se* [426]. Indeed, design ethnographers actively engage with product designers, engineers, and developers to determine what is essential for the design from a user-centered perspective. Using fieldwork techniques, they collect and transmit domain-specific data to design teams about users' goals, needs, tasks, and knowledge, as well as the work context in which they operate [231]. Ultimately, ethnographers help ensure that the solution developed is consistent with end-users' needs and goals, and the implementation domain's requirements.

There are many analytical frameworks for understanding and describing user behavior in real-world situations : for example, Naturalistic Decision-Making (NDM) [217, 231, 427] Cognitive Work Analysis (CWA) [59, 231], and Ergonomic Work Analysis (EWA) [16, 337]. These frameworks enable ethnographers to provide detailed descriptions of the work conducted by subject matter experts (SMEs), especially the sociocognitive dimension (e.g., problem-solving strategies, decision-making processes). In addition, NDM, CWA, and EWA recognize the importance of the contextual factors modulating work performance and thus end-users' cognition and possible course of action, that is, the field of possibilities [16, 231, 428]. For example, industrial environments rely on high-quality standards to meet customer requirements and minimize production costs, ultimately determining the rules that operators must

4. In this article, the word end-user refers to the actors who interact directly with the technical device.

apply to evaluate manufactured parts. These domain parameters may motivate the need for additional explanations. Thus, each of the presented frameworks relies on a system approach that involves two complementary layers of analysis to understand users' activity in complex environments [16, 231] :

1. Work Domain Characteristics (the "why") : "focus on the *domain-driven factors* that shape, support and constraint human performance and behavior" [231].
 - (a) Task requirements : *expected outcomes in terms of quantity and quality of work ; clarity of instructions* [16] ; for example, there might be ill-defined instructions.
 - (b) Organizational settings : organization of work, teamwork and interdependencies among workers, task allocation, work system processes, employee training.
 - (c) Physical environment : workstations, equipment and materials
 - (d) Socio-cultural environment : hierarchical relationships, leeway for operational decision-making, institutional rules, and legislation
2. User Activity (the "what and "how") : focus on the situated aspect of SMEs' work encompassing problem-solving strategies, meaning-making, and decision-making processes, knowledge applied, and skills required *that allow them to operate successfully in the domain* [231]. The goal is to deepen the analysis of expertise to discover how operators deal with the domain's characteristics (e.g., work requirements and institutional rules), the inherent variability of processes, the decentralization of work, and the dynamic nature of contemporary work environments [231, 429]

Field studies are accompanied by various data collection techniques to elicit relevant content on work domain characteristics and user activity/mental models⁵. The techniques commonly used include observations, interviews, focus groups, process mapping, card sorting, and field-work experimentation with SMEs [21, 220, 228, 231]. Researchers vary their data collection methods to avoid bias and ensure a rigorous methodology [57]. This variation also aims to elicit knowledge that could not be obtained with a single method. For example, think-aloud protocols (concurrent verbalization when executing a task) and retrospective interviews with textual, audio, or video field data are well equipped to enhance the in-situ observations. Ethnographers may be able to understand the SMEs' cognitive work requirements, information used, and problem-solving strategies in real time ; and then support a "scaffolding" construction of users' mental models [220]. For XAI, the output of these field studies is used to guide the specification of explanation needs (whether local or global).

5. User understanding and representation of a process, a phenomenon, or a system [220]

7.3 Proposal : User-Centered XAI Framework

7.3.1 Methodological Considerations

The proposed methodology for conceptualizing and developing a user-centered XAI framework consisted of the four iterative steps depicted in Figure 7.1. Considering that user-centered XAI research is a cross-disciplinary, and relatively new topic, we combined different approaches to propose the user-centered framework. Our methodological process was inspired by the taxonomy design phases proposed by [350] (especially for the choice of different inductive, deductive or intuitive approaches) and by the step-by-step process proposed by [175] for framework development. An empirical-to-conceptual approach is defined by a set of known features that the researchers wish to classify or aggregate [350]. These sets of features were elicited from inductive research in our case. In contrast, in a conceptual-to-empirical approach, the researcher begins by conceptualizing the dimensions of the taxonomy without examining actual objects [350]. Finally, an intuitive approach is characterized by researchers' ad hoc endeavors to develop an artifact (here, some aspects of the framework) based on their current understanding and perceptions of what makes sense [350].

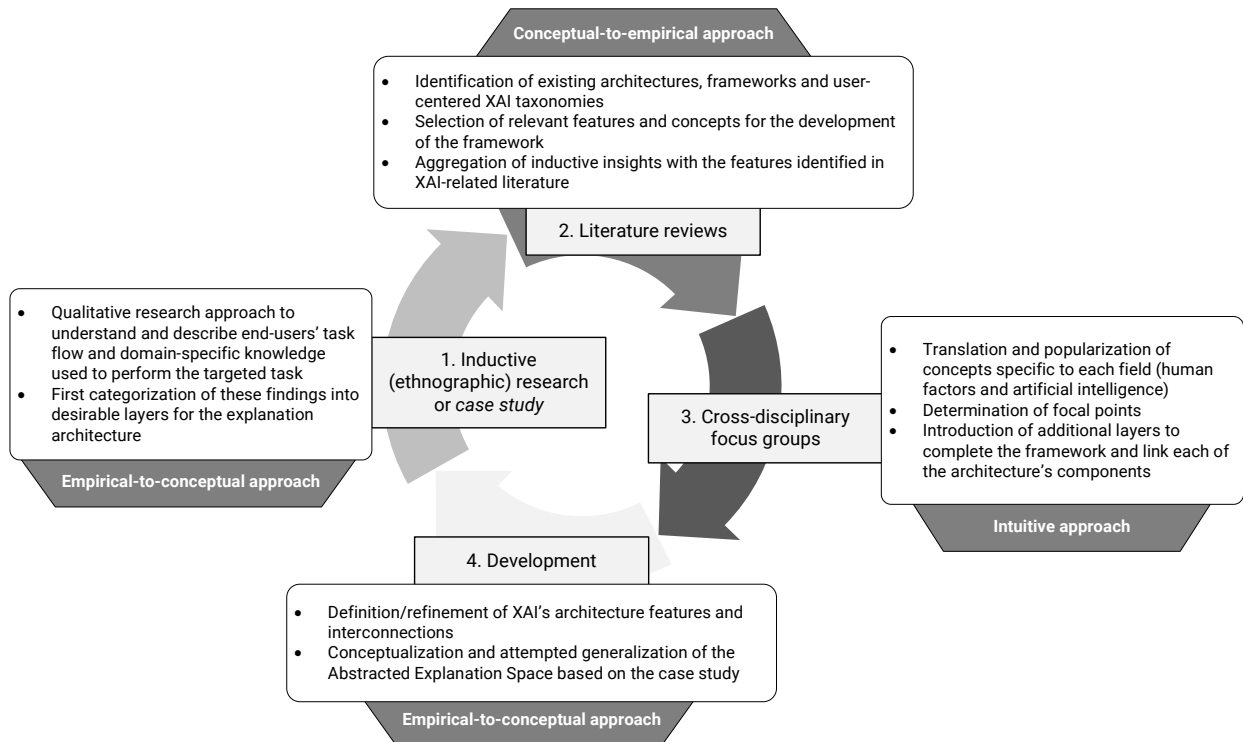


FIGURE 7.1 Overview of our methodical approach to elaborate the framework

We first determined how to qualify end-users' explanation needs based on a current quali-

tative case study. Using an empirical-to-conceptual approach, we evaluated the framework’s core features related to the human component of the architecture. We deduced the most relevant features for developing our framework based on dual-objective literature reviews on context-dependent and context-independent considerations in XAI. We then aggregated the evidence-based knowledge obtained during the inductive research to fit the identified features (conceptual-to-empirical approach). In the third phase, given the literature’s current limitations and lack of cross-disciplinary endeavors related to XAI, we used an “intuitive approach” to aggregate, translate or propose additional relevant concepts to complete our framework [350]. This step required several discussions and focus groups to identify focal points and introduce additional features into the framework. In addition, the interrelations among the framework’s features also followed an intuitive approach. Finally, in the last step, we refined our architecture. This kind of refinement follows an iterative process that may result in the need for additional work in previous phases. Based on the explanation space we derived from our case study, we conceptualized and generalized a context-independent framework with its associated formative tool : the Abstracted Explanation Space. Thus, the tool’s development followed an empirical-to-conceptual process.

7.3.2 User-Centered XAI Framework

Many XAI specialists argue for a more human-centered approach to address local and global explainability [220, 388, 389, 422]. Such an approach would capture the essence of end-users’ work context to develop task-specific explanations that align with their goals. The proposed framework is consistent with this line of thinking. Our approach is motivated by a system approach that considers the operating context as a determining element in the design choices for the XAI. Before presenting it, we want to clarify its scope and limitations. The formative tool (Abstracted Explanation Space, see section 7.3.3) supports the deployment of the framework that aims to guide the design of “tailored” explanations for real-work situations, particularly identifying and validating the relevant content that users need to perform a specific task. Therefore, aspects concerning the calibration of ML models *per se* are not presented in this document, nor are the effects of explanations on users (e.g., trust). Motivations stem from a persistent gap between ethnographic analysis (or user studies) and system design, reinforced by new AI-powered system design methodologies [67, 69]. Because XAI relies on context-dependent criteria, designers need tools that help them identify and use contextual insights to design tailored explanations and select the appropriate presentation format (based on business, work, and end-users’ requirements). The goal is to guide designers on what, why, how, and when information about the tasks or rationale of the automated system should be disclosed [385]. Drawing on ethnographic approaches, it starts by gathering business and

work requirements to define what should be explained from the users’ perspective. The knowledge gathered in ethnographic inquiries is then used to define the appropriate ML model that provides the required explanations. Five features that shape the human-XAI interaction were identified, ultimately delineating the explanation space for a *specified task* (Table 7.1).

Targeted Task and Sociotechnical Context. Before working on the XAI technical system, it is necessary to understand its context. The ethnographer responsible for this work package must collect data to understand the purpose of the work system and the role of end-users in it : “What is the end-user trying to achieve?” To do this, the ethnographer must discover the domain-driven factors and constraints that shape human performance in order to understand and represent the end-users’ work activity adequately : “How and why are they working that way ?” (See section 7.2.3 for theoretical details and practical considerations).

This step fulfills two goals. The first one is to determine automation opportunities regarding task and explanation requirements. The second is to investigate how the sociotechnical context (rules, regulations, and laws) constrains the execution of the work. Indeed, the design of a reliable system depends on its ability to respect the constraints imposed by the work domain. In addition, end-users might expect explanatory content regarding domain-driven constraints (e.g., expected quality outcomes and task success criteria).

Tableau 7.1: XAI Features

Features		Content
End-users model	mental	A simplified representation of a person’s mental structure and functioning of a system, concept, process, or problem to be solved. It encompasses different forms of background knowledge, whether explicit (domain concept and principles), declarative, procedural, or contextual [220].
End-users process	cognitive	Mental steps/actions that a user undertakes to achieve a goal (usually represented in a <i>flowchart</i>). Procedures can specify some of these steps, but user studies must present a complete picture.
User Interface		Materialization of the interaction where informational requirements (content, format, and presentation timing) have been carefully studied to meet end-users’ needs (mental model and cognitive process).
Human-Explainer Agent		This Agent provides meaningful explanations to the user of relevant classifications made by the Classifier Agent. It is a set of algorithms that interprets the classifier’s decisions according to the objectives pursued by the users.
Classifier Agent		Set of ML models that automatically performs the classifications required for the task.

End-Users' Mental Models

After defining the task and its associated domain-driven constraints, the ethnographer must find out how people make decisions based on their representations of the surrounding environment. This mental representation is often called a mental model in cognitive science [220,430]. It comprises an organized set of knowledge and concepts that structure the relevant aspects of a process, system, or phenomenon (with causal relationships between concepts) [430]. The ethnographer seeks to elicit end-users' mental models for the targeted task using ethnographic fieldwork methods [220,225]. The focus should be on understanding the cognitive work done by end-users and the relevant information and knowledge they use. The next step is identifying why and how this knowledge is processed according to the objectives pursued and the domain-driven constraints.

End-Users' Cognitive Process

The end-users' cognitive process represents the decomposition of their cognitive task flow (or mental actions) for the targeted task. The ethnographer can choose a coarser or finer description layer depending on the complexity. This step can usually be represented with a hierarchical *flowchart* or *decision tree* [228,431]. The End-Users' Cognitive Process is linked to their Mental Models, as these contain the relevant information and knowledge they use for each operation.

User Interface

The interface is the channel between the machine and the end-users. The fit between the end-user's needs and the user interface is determined by a clear understanding of the end-user's cognitive process, goals, and associated mental models. Indeed, understanding the user's context provides empirical data to define the explanations that should be disclosed : does the interface provide the necessary explanations that enable the user to fulfill its operational goals (context-dependent criteria) ? Has the representation format been designed so users can quickly understand the system's relevant decision or reasoning features (context-independent criteria) ? Do the explanations keep users in the control loop while supporting their cognitive process (context-dependent criteria) ?

On the other hand, the interface embodies the interaction between the explainable model(s) and the Human-Explainer Agent. These explanations are exhibited in text, images, figures, or a combination of these three elements. They can be attribute-based, concept-based, contrastive, or counterfactual. They depend on the end-users' needs for a specific task or operation

and the Human-Explainer Agent’s capability.

Human-Explainer Agent

The Human-Explainer Agent is a set of algorithms that explains the relevant decisions made by the Classifier Agent from the perspective of the end-users’ goals and tasks (e.g., SHAP or LIME). More generally, if the classifier is an inherently interpretable model, this Agent would be embedded within it. However, the model is assumed to be an opaque classifier or black box, for the sake of simplicity. Therefore, this Agent’s input is the model (the classifier), and its output may be provided in different ways : images, text, examples, or local or global explanations, depending on the system’s requirements. The Human-Explainer Agent interacts with the end-user through the User Interface. On the other hand, the Human-Explainer Agent could be composed of multiple algorithms (explainers), depending on the number of classifiers and explanations required. They can be trained independently and give the user a broad overview of the decisions made by the algorithm.

Explanations follow the three complementary layers from the Situation Awareness-based Agent Transparency (SAT) model [392,425,432] and are strongly inspired by the psychological concepts that characterize a good explanation for human beings [13, 392, 425, 432, 433] :

- XAI1 Perception (“What?”) : concerns the relevant content that users should perceive to pursue their goals or perform a task in correspondence with the automation [385]. It is directly linked with the user’s goals, the knowledge the user already possesses, and the additional knowledge required [51,220]). Examples of guiding questions are : What decision should be explained to the user during this operation ? What part of the model should be interpretable ? What aspect of the situation is relevant to the user ? Is the decision sensitive, critical, or somehow important in the work context ?
- XAI2 Comprehension (“Why?”) : relates to the understanding of the Agent’s rational model that led to this outcome (or causality). Depending on the task and user needs, the explanations may focus on specific features of the situation or provide a complete description. Examples of guiding questions are : Why does the system provide this output ? What are the reasons behind its decision ? What governing rules, criteria, and domain-driven factors influenced the decision ? Should explanations be systematically displayed, or are there events, triggers, or cues that activate the need for explanations [51] ?
- XAI3 Projection (“What if?”) : relates the choices made by the Agent to other similar courses of action by providing contrastive and/or counterfactual explanations [13]. Examples of guiding questions are : *Why was this decision taken instead of other*

ones [397] ? How would the system react to a slight change in the input ? What happens if we adjust the X features/parameters of the image with Z ?

These layered explanations are linked together and form an explanation object that the user can access by a query [433]. The human may ask for finer details on AI actions or decisions by navigating through the different layers based on situational needs. Thus, each essential operation comprises an explanation object that provides tailored explanations of agent actions (“what”), agent decisions (“why”), and counterfactual or contrastive explanations (“what if,” “how”).

Classifier Agent

The Classifier Agent is a set of ML models that automatically performs the classifications required for the system. These ML classifiers can be either inherently interpretable or black boxes, or both. Each of their classifications will be interpreted by the Human-Explainer Agent

7.3.3 Abstracted Explanation Space

The Abstracted Explanation Space (AES) is a formative tool aggregating each XAI architecture’s components (Figure 7.2). The primary function of the AES is to elicit explanation requirements by aligning user-based studies with XAI technical possibilities and capabilities. The tool therefore endorses a boundary object function to achieve common ground with designers, enabling cross-disciplinary design thinking that supplements a narrow algorithm-centric vision with a sociotechnical vision [51]. Choosing the appropriate format and properties of explanations is facilitated by a clear definition of the end-users’ needs, tasks (plus the associated mental models), and, more broadly, the work context. It enables designers to turn evidence-based knowledge from user studies into multilayered explanations, considering the following factors :

- Content : given the cognitive work requirements for a specific task, *what* explanations should be presented ? Here, the subgoal is to provide the user with only the information that matters to pursue their work goals. Also, because the *explanation objects* are multilayered, users may query access to delve deeper into the XAI’s rationale (XAI2 and XAI3) and assess *why* these explanations are trustworthy.
- Format (presentation) : explanation display : *how* should these explanations be presented ? Should the explanations be linked to additional information so that users can efficiently process and make sense of the data (e.g., counterfactual explanations) ?
- Timing : information flow and temporal aspects : *when* should these explanations be

presented? Understanding the end-user's cognitive process helps define temporal specifications.

The AES has two distinguishing characteristics : first, its reliance on user-centered design and ethnographic fieldwork to define XAI structure upon the overarching goals of end-users ; second, its insistence on intertwining end-users' characteristics and artificial agents' features to define the explanation space through the user interface (Figure 7.2). The end-users are represented by their cognitive process and the associated mental models. The artificial agents are represented by the Human-Agent Explainer and the Classifier Agent. The interface is the channel between the two parties.

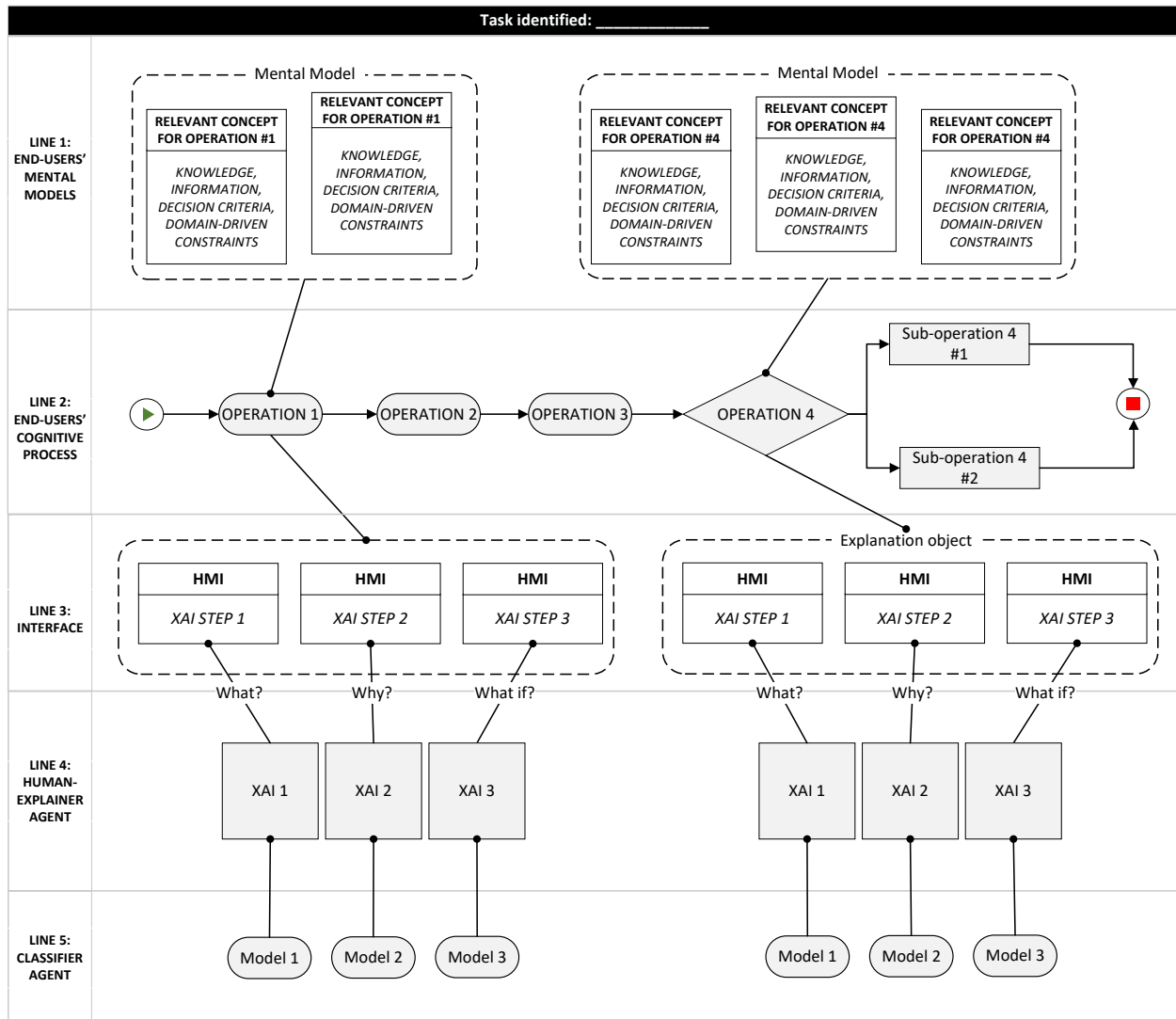


FIGURE 7.2 Abstracted Explanation Space

After defining the task subject to automation, the AES's starting point consists of decompo-

sing the end-users’ cognitive process and identifying the operations that require an explanation (Line 2). In Figure 7.2, *Operations 1 and 4* are crucial for the given task. The content to be explained for each of these operations is defined by the users’ mental models (Line 1). Note that *Operation 4* is a knowledge-intensive decision-making task in our hypothetical example and requires a finer-grained level of decomposition (*suboperations*). Completing Lines 1 and 2 enables one to identify and document the explanations to be displayed on the interface for each task or goal pursued (Line 3). The User Interface displays the relevant characteristics of the task from the end-user perspective. The upper part of the AES constitutes the factual user input that informs designers as they select the most appropriate explainable models. Moving down the AES’s axis, these factual pieces of evidence are aggregated within the ML solutions : Human-Explainer Agent (Line 4) and Classifier Agent (Line 5). Based on the content that needs to be explained, the ML specialists can judiciously select the most appropriate models and format for explanations regarding each layer of the Human-Explainer Agent (see section 7.3.2).

7.4 Case Study : Aerospace Industrial Inspection

The case study concerns a highly innovative project that was strongly motivated to partially automate aerospace industrial inspection⁶. This mainly manual, bureaucratic job involves monitoring the serviceability of high-level aircraft engine components, or in other words, certifying that a component is free of potentially harmful anomalies. A simplified version of the process is presented in the following subsection. The technical solution design involved a consortium of several industrial practitioners and academics to develop the hardware (cameras, probes), the software (modules, data model, XAI algorithms), and the human-automation interaction. Ultimately, some of the inspection process tasks will be automated to assist human operators in Human-Automation teamwork scenarios.

7.4.1 Targeted Task and Sociotechnical Context

Aerospace industrial inspection occurs in a highly regulated environment in which companies must operate within safety policies and international norms. Inspectors are the operators responsible for carefully examining the condition of engine components to determine their serviceability. They do this by examining each component individually for anomalies that could compromise the part’s strength and durability (this phase is also called “visual search”). Then, they interpret any anomalies detected with the work domain’s decision-making criteria

6. <https://www.mitacs.ca/en/projects/automated-visual-inspection-sentencing-dressing>

to decide whether a defect is acceptable, acceptable with a repair, or unacceptable (this phase is also called *decision-making*). These context-dependent criteria come from different sources : operational procedures, domain rules, and results from the knowledge and experience gained by the inspectors. They may relate to the defect’s physical characteristics, the history of the inspected part, its general condition, the possibility of applying subsequent repair operations to remove the defect, or cost saving (e.g., avoid unnecessary manufacturing costs and turnaround time).

7.4.2 Inspectors’ Cognitive Process

We conducted an ethnographic work analysis to capture the situated aspects of the inspectors’ decision-making processes. We used various data collection methods involving *in situ* observations (with and without concurrent verbalization), interviews, and field experiments to elicit inspectors’ mental models. The goal was to understand how inspectors gather, process, and apply knowledge/information to diagnose component conditions and how they deal with domain-related factors (norms, institutional rules, standard operating procedures). Table 2 presents the data collection metrics for the user study.

Tableau 7.2: User study details

Data collection methods	Inspectors (N)	Unit of Analysis (n)	Minutes
Observations (with or without concurrent verbalization)	7	11	1110
Interviews	11	26	810
Field experiments	4	6	660
Total	11	43	2580

Inspecting a part is a complex information-processing, meaning-making, and decision-making task (see Figure 7.3). Inspectors’ cognitive process (or task flow) can be broken down as follows⁷ :

1. Perception (multisensory search) : scan the part to detect any anomalies :
 - (a) Detect or discriminate a defect on the part
 - (b) Locate the area where the defect appears
2. Meaning-making and decision-making processes : interpret the anomaly according to the work domain’s decision criteria to decide its status :

⁷. This simplified process does not list the upstream tasks related to the preparation of the workstation, or the downstream operations after the response

- (a) **Classify (characterize) defect type**
 - (b) Assess the defect's characteristics : dimensions (length, width, depth) and overall condition
 - (c) Compare and interpret the defect's characteristics with the associated rules, standards, norms, and domain-driven factors
 - (d) Decide about the defect's state : acceptable as is, acceptable with repairs, or unacceptable
 - (e) Return to the scanning phase until no more anomalies are detected
3. Response : actions to be taken following the diagnosis of the defects present on the part :
- (a) Decide about the part's state : serviceable, salvageable or non serviceable
 - (b) Prescribe repair operations to remove the defect and restore the part
 - (c) Record defect metrics on a damage record sheet
 - (d) Perform computer work and optimization

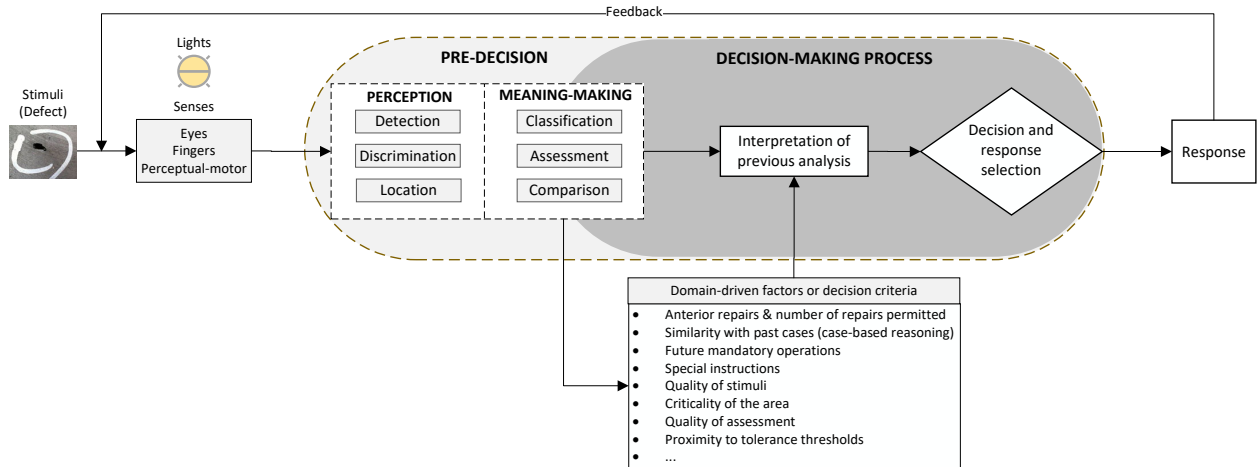


FIGURE 7.3 Overall cognitive process - industrial inspection

In our XAI application, we decided to apply the Abstracted Explanation Space (AES) to the first task of the meaning-making and decision-making processes : classification of the defect type. Indeed, it is expected that the automated system will carry out this task in future work situations.

7.4.3 Exposing Inspectors' Mental Models for the Defect Classification Task

Analysis of inspectors' work suggests that the relevant knowledge in their mental models for the classification task concerns the distinctive attributes that characterize each defect and

the area of defect occurrence.

Attribute-based classification. In semi-structured interviews, we asked inspectors to define the distinguishing attributes of each class of defect. We also consulted internal documents that defined all defects, with associated images and specific attributes. As defined by [376], this step is crucial in the inspection process :

"Identifying the type of damage is mandatory, as tolerance thresholds differ according to the type of defect. For the same depth and width, one defect could be acceptable and another one non-acceptable. Inspectors have developed strategies over time to recognize defects by their attributes [...] For example, a “nick” is an impact defect that causes a vertical movement of the material along the defect contour (raised material). The presence of high material is distinctive of nicks. Inspectors rely on tactile or perceptual-motor feeling (using a stylus) to detect any material variation on the contour or the bottom (floor) of the defect (Figure 7.4). A “dent” has similar properties but with a horizontal material displacement. Finding high material around the damage is unusual."

Figure 7.4 presents the insights gathered through documentation analysis and elicitation of knowledge from inspectors to classify damage types. It provides the relevant cues that guide XAI system specifications. The system should be able to (1) define the relevant combination of attributes that categorizes each defect [376] ; (2) provide explanations that allow inspectors to understand the relevant attributes that led the machine to classify the defect as it did (attribute-based explanations) ; and (3) generate counterfactual visual explanations for a defect – specifying why the defect was classified as class A rather than class B (counterfactual explanations). During this third step, the Agent specifies the relevant attributes extracted from the inputted images and compares those attributes with similar defects from the same family (nick, dent, gouge, bent, erosion).

Area of defect occurrence (location of part). Another important point concerns the different areas of the part : Acceptance/refusal criteria change from one to another. For example, the same defect may be acceptable in Zone 1 and not acceptable if it appears in Zone 3 (Figure 7.5). The inspector identifies each area with or without additional inspection aid tools and their boundaries. Similarly, the system should accurately map the different zones and the boundaries between them. Inspectors also rely on causal reasoning to generate hypotheses about the causes of defects and better identify their class. For example, they expect to see only certain defects in specific areas of the component, depending on their positioning in the engine. The system should indicate the area of defect occurrence to support inspectors’ causal reasoning and allow them to check (and trust) the accuracy of the system

Nick	Dent
Appearance Shallow cavity (asymmetrical - heterogeneous)	Appearance Deep cavity (uniform - homogeneous)
Attributes / Conditions - Tangential or angular impact (*) <i>Uniform = no</i> (*) <i>Defect "floor" = sharp (stylus)</i> - Defect edges = sharp (touch= "catchy") (*) <i>High material = yes (usually)</i> (*) <i>Material displacement = vertical (raised material)</i> - Material removal = maybe	Attributes / Conditions - Tangential or angular impact (*) <i>Uniform = yes</i> (*) <i>Defect "floor" = "rounded" (stylus)</i> - Defect edges = smooth (touch= "soft") (*) <i>High material = maybe (unusual)</i> (*) <i>Material displacement = horizontal (material compression)</i> - Material removal = no
Expectations - Concave airfoil (near Edge #1)	Expectations - Concave airfoil - Edges #1 and #2
Fan Blades - Same tolerance limits in less critical areas (Zone 1, Zone 2), but deviations are observable in critical areas (Zone 3, Zone 4, Root) - Inspectors detect high material around defects using a scribe (stylus)	

FIGURE 7.4 Defect attributes, appearance, and expected areas of occurrence for nicks and dents. The attributes in italics with the prefix (*) are those inspectors rely on to distinguish between these two similar kinds of defects.

classifications.

7.4.4 User Interface

The User Interface materializes the interaction between the inspectors and the artificial agents. Relevant local and global explanations are provided to inspectors for classification in a usable form. The Human-Explainer Agent provides samples and highlighted images to the end-user. Textual explanations are also generated, as shown in Figure 7. Inspectors can request specific explanations from the interface menu.

7.4.5 Human-Explainer Agent

The Human-Explainer Agent explains the relevant decision made by the Classifier Agent from the end-user's perspective. The Classifier Agent detects, locates and classifies the defects, and the Human-Explainer Agent provides meaningful explanations for each of these tasks in parallel.

XAI1 Perception – Defect Detection and Location (What ? Where ?). Attribute-based explanations for the detection and location of the defect are the first XAI1 component of this process. The Classifier Agent automatically detects and pinpoints the area where a

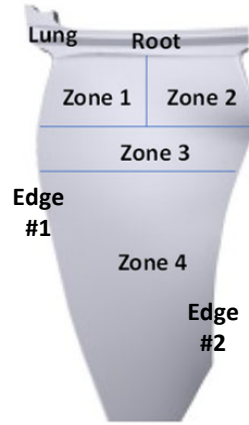


FIGURE 7.5 Different areas of the Fan Blade

defect is perceived. It is expected that this algorithm will have learned that some areas are more sensitive than others. For instance, the detector may know that, if a defect is detected in Zone 2, its relevance could be different than if it is found in Zone 4, since Zone 2 needs to meet higher quality standards than Zone 4. However, to ensure that this knowledge is integrated into the process, zone-limit-based decision rules are implemented in the last part of the detector decision. In doing so, the system explains where and in which zone the defect was detected. If a mechanism such as this decision-rule-based mechanism is not implemented, we would have to trust that the detector had learned and intrinsically incorporated this knowledge into its decision mechanism. Thus, we would not have a simple explanation. On the contrary, the Human-Explainer Agent displays a first visual and textual explanation of the defect. So, the inspector can instantly receive an explanation of the form “[type of defect] on the [zone]” and the inspected part’s image with the defect highlighted.

XAI2 Comprehension – Defect Classification (Why?). Although adversarial training and data augmentation are used to train the Classifier Agent, the XAI2 component independently aims to guarantee that, if the XAI1 fails, it will do it safely. In this component, adversarial detector methods identify new adversarial observations that XAI1 does not identify. Methods based on SHAP values or HAWKEYE detectors are used for this purpose. If the inspector validates the observation as an actual adversarial observation, this new observation will feed the example repository of the adversarial detector ; thus, it will continuously improve its performance. Moreover, counterfactual and contrastive local explanations are automatically provided in visual and textual modes. A set of examples regarding the classified defect is displayed to the inspector so he or she can reinforce or change the automatic decision. Figure 7.6 shows the explanation concerning a scratched part ; the red and blue dots on the images reflect the pixels’ positive and negative relationships with the prediction. In

other words, the blue dots on the image labeled pitted surface – on the right side of the figure – explain why the classifier did not classify this example as a scratch rather than a pitted surface. Conversely, the red dots on the same image show the pixels more associated with a pitted surface. Based on this information, the inspector decides whether the defect is a scratch or a pitted surface.

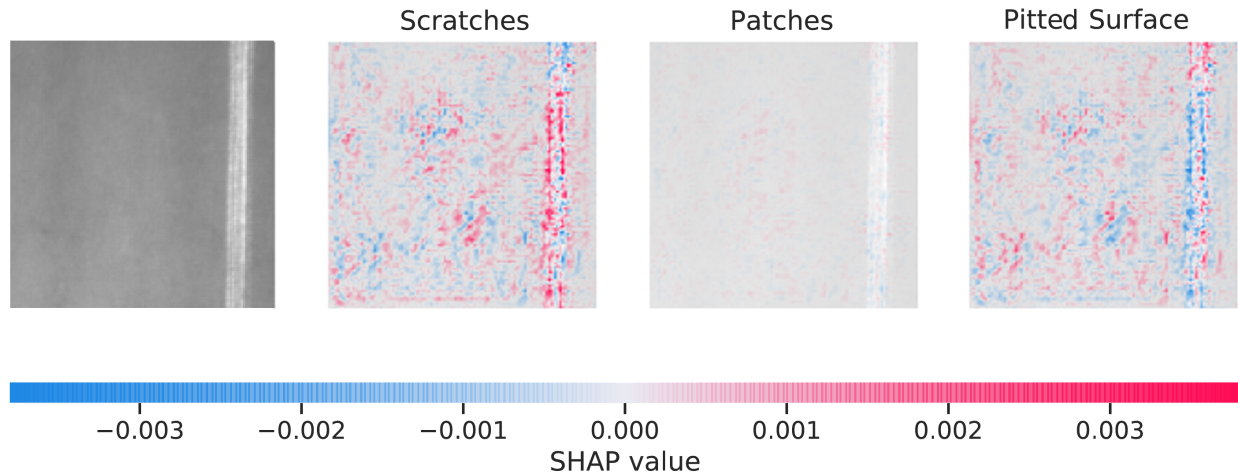


FIGURE 7.6 Contrastive explanation of a type of defect based on SHAP values. The sample image on the left side is an original image taken from the NEU surface defect database [24–26]. The three following images highlight the pixels that positively (red) and negatively (blue) affect the classifier’s decision.

XAI3 Projection – Defect Comparison (What if?). Exposure, sharpening, contrasting, and other picture tone parameters are also shifted to reveal some defect characteristics that the XAI2 component may not have detected ; this procedure generates hundreds of pictures to be sent back to the classifier and compared with similar examples. Some textual explanations are provided in the form “if the [photo parameter] is adjusted, the defect would be [type of defect].” This kind of explanation would help, for instance, to compare a nick with a dent ; some textures or tone settings may highlight the contrast in the edges of the defect and allow the classifier to detect material displacement. To avoid sending irrelevant information to inspectors, only counterexamples are revealed by the system. On the other hand, since XAI3 handles parameters initially tuned in the cameras, it might help detect the need to recalibrate those devices or reveal out-of-control environmental factors such as vibration, noise, and brightness.

7.4.6 Classifier Agent

The Classifier Agent detects, locates, and classifies defects following the inspector's cognitive process. This Agent outputs decisions based on trained ML models and inputted images. As mentioned above, this Agent also executes adversarial detection to ensure the system's safety.

7.4.7 Abstracted Explanation Space

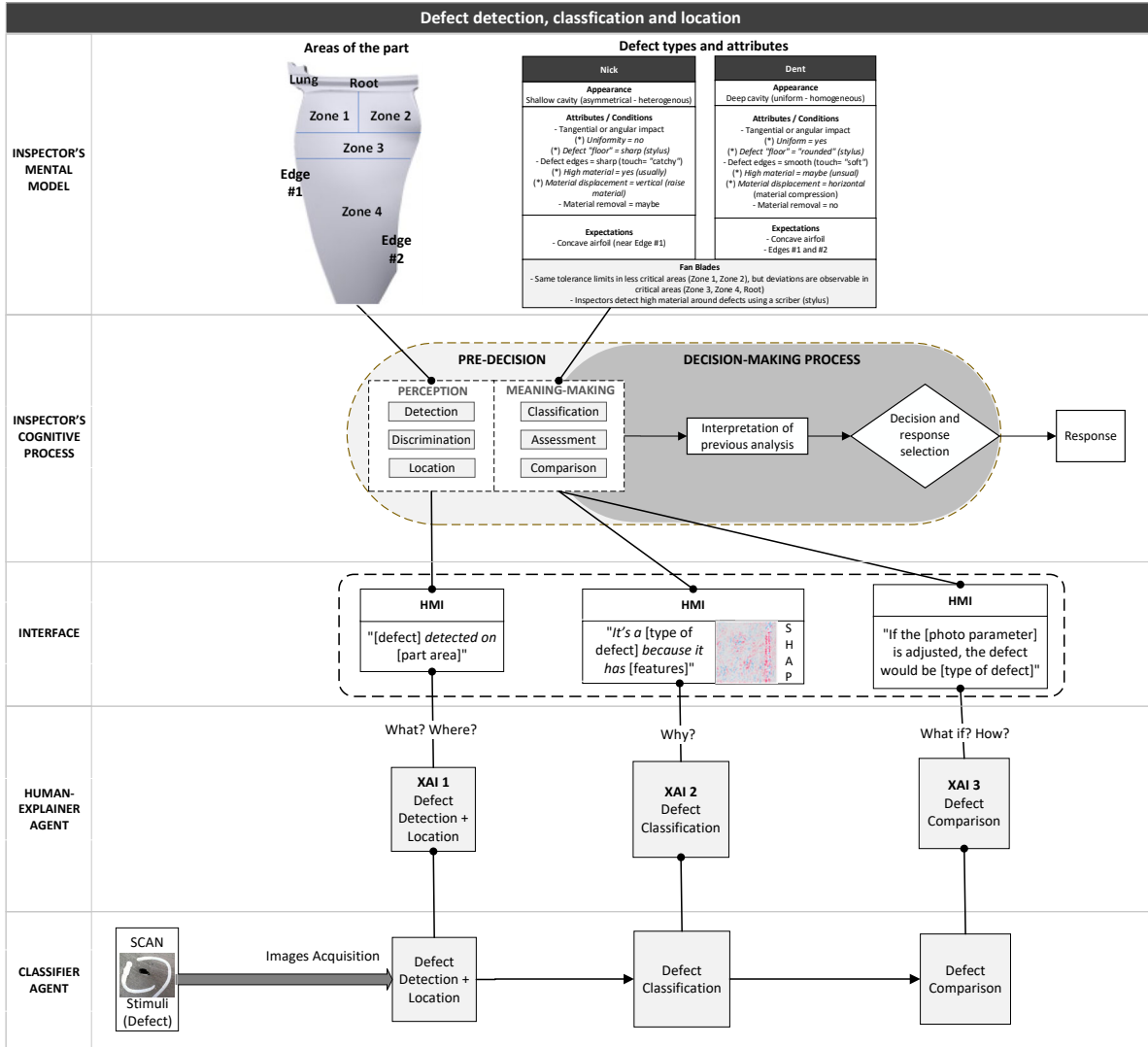


FIGURE 7.7 Abstracted Explanation Space for defect detection, classification, and location tasks in aerospace industrial inspection

Figure 7.7 shows the Abstracted Explanation Space, which aggregates the different features of our framework for the classification task. Since the automated system will perform the

defect detection task using advanced computer vision technology, the sequence of actions will change from the current “manual” process. The inspector will no longer scan the part for potentially dangerous anomalies. The system will be responsible for performing these actions and displaying the information and explanations that the inspector would naturally find during the “manual” process. These elements appear in the first two lines of the AES to detect detection and are implemented using the sequence of XAI1 and XAI2 layers. XAI3 corroborates the output provided by XAI2 in case of unexpected events that surprise the inspector. The system’s users may request an explanation if needed.

7.5 Discussion

In this paper, we introduced an emergent framework that links the situated end-use of a system (encompassing the operational requirements and the user’s needs, tasks, and goals) to the technical development of explanations. In this section, we first discuss the empirical and theoretical contributions of the AES in envisioning explanations for situated end-use. Thus, we reflect on the paper’s theoretical implications for XAI design spaces. We then derive preliminary application guidelines for other contexts. We conclude by discussing the study’s limitations and pointing out avenues for future research.

7.5.1 Envisioning Situated End-Use with the AES

The inherent complexity of explanation design raises questions that must be informed by a conceptualization of situated end-use, a view also expressed by [70]. As a step forward, we proposed a formative tool that incorporates previous conceptual developments and design principles for user-centered explanations [51, 389, 392, 425]. Our work is consistent with the idea that XAI design initiatives should start with a deep understanding of the application domain (ethnography or user studies) that ultimately informs explanation requirements and model development (algorithmic artifact). We propose to unite these two parallel streams through the AES to deliver actionable explanations that are meaningful for situated end-use. The ongoing case study shows the importance of addressing the work context and users’ needs when designing XAI-based solutions. For a targeted task, it represents how the relevant components for successful human-XAI interaction are linked together and how the automated system will fit into the envisioned environment. We agree with [51] that it is pointless to develop explanations *outside the work context*. Our framework is grounded in user-centered and Human-AI teaming perspectives; the generated explanations should (1) support end-users in accomplishing their operational tasks; and (2) develop shared mental models in the Human-AI team [434]. The pitfall to avoid is providing robust and intelligible explanations

that do not align with the team's objectives; in other words, designing self-explanatory cutting-edge technologies with limited utility or providing information that is not needed for the task at hand. This situation could overload the inspector's cognitive state [435], adding information retrieval, processing, and filtering operations on top of the sociocognitive work to be done. Given that inspecting a part is a knowledge-intensive work in which operators must make sense of many data sources, the XAI should effortlessly be integrated into their actual work practices.

The AES makes practical contributions from this perspective, as the cognitive task flow and required domain knowledge for situated end-use are explicitly represented. The tool can be extended to encompass additional actors in the sociotechnical context who will be directly or indirectly affected by the technical device [436]. Because the introduction of technological tools changes work dynamics, other sociotechnical actors (distant from the device's physical location) may also need explanations or have to understand the XAI system's rationale. The AES could be used to elicit the explanatory needs of sociotechnical actors who work closely with inspectors.

Staying within the context of our case study, diagnosing the condition of a part as serviceable or unserviceable has implications for the work of inspectors and technical representatives. They must inform customers that a part needs to be changed and find a compromise with them. To do this, they may need additional information (explanations) that the inspectors would provide in the manual process, for example, reason(s) for rejecting the part instructions for its replacement. We plan to apply the framework to other tasks in the inspectors' workflow to explore this aspect. Classifying the defect into the appropriate category is not the only decision point. Looking at their cognitive process (Figure 7.3), inspectors would benefit from AI aids to process the many decision criteria for determining the component's condition.

7.5.2 Cross-Functional Design of XAI-Based Systems

Bridging the gap between the situated end-use and AI model development requires orchestrating the collaboration of an ecosystem of stakeholders with distinct roles and points of view [70]. One possible way of aggregating every point of view in the explanation design space is by relying on design artifacts such as the AES. Our work resonates with the concept of *tangible thinking tools* [437], whereby "design tools narrow the gap between abstract concepts and concrete implementation by allowing complexities to surface as part of the design process" [437]. Despite the need to transcend disciplinary barriers to develop reliable AI solutions, the XAI community has not commonly adopted and created such tools. Our work has similarities with the *Model Cards* proposed by [438]. Those authors wanted to develop

a shared understanding of ML Models among stakeholders by creating standardized cards (design artifacts) that summarize the model’s features, functioning, and purpose. We took a slightly different path by proposing and exemplifying an artifact that structures collaborative ground-truthing efforts [439]. For example, designers (or ethnographers) may identify the domain-specific data required to develop the model and provide those data at the right time and in a format developers can exploit [28]. These actions and dialogues are necessary to develop a shared understanding among team members seeking to align ML solutions with business requirements (including the intended usage of the AI model in work practices [70]. The AES contributes to XAI design spaces by structuring an ecological path [69] to designing explanations within multidisciplinary teams. This is a step forward in incorporating the necessary competencies and approaches from multiple disciplines, namely Human Factors Engineering and Artificial Intelligence, to tackle the upcoming sociotechnical engineering challenges [145]. Future research is needed to study how stakeholders adopt and use the tool during the AI development life cycle. Special attention must be paid to evaluating the artifact’s ability to support cross-functional work to develop actionable explanations. This empirical basis will allow the framework to be refined and generic XAI design principles to be derived for real-world contexts.

7.5.3 About a Generalization to Other Contexts

This article shows the foundation of the AES and its application to a specific case : aircraft parts inspection. This framework supplements more generic guidelines and legislation that control and support the deployment of AI-based systems in real-world environments, such as the Aletheia Framework⁸ or the principles for ethical AI⁹. However, future research and applications are needed to generalize the framework to other contexts and domains. There is still no consensus on models that can be responsibly implemented for high-stakes decisions [414]. We advocate relying on complete validation processes to ensure safe, efficient, and trustworthy AI-based solutions [138, 440]. For example, researchers can use the AES to elicit and define explanation requirements and validate design concepts by applying the Box-Jenkins Framework for safe AI [440]. The following paragraphs present some considerations and lessons derived from our case study for applying the AES to other AI projects.

The application of this framework to other domains or environments should begin with a thorough understanding of the operational dynamics – ideally through field studies [368] –

8. <https://www.rolls-royce.com/sustainability/ethics-and-compliance/the-aletheia-framework.aspx>

9. <https://www.canada.ca/en/government/system/digital-government/digital-government-innovations/responsible-use-ai.html>

and the inclusion of affected stakeholders in the design team [70, 436]. In collaboration with domain experts and ML specialists, the ethnographers (or other qualified fieldworkers) should select a task from the end-users' workflow to apply the framework. The relevant insights obtained from the ethnographic studies are then aggregated to the two upper layers of the AES, namely the end-users' mental models and cognitive processes. Then the design teams must move to the fourth layer : the Human-Explainer Agent. This section must be designed to fit the modalities of operational dynamics and work requirements. In highly dynamic operational environments (e.g., military), end-users work in time-sensitive situations with little or no tolerance for delays in processing information [145]. In less dynamic environments, end-users may have sufficient time to process the explanations displayed by the XAI model and analyze the reasoning behind them (e.g., a recommender system for strategic planning).

On the other hand, the assumption behind this Human-Explainer Agent is that the task can be split into small tasks, each task aligned with the situation awareness process (Perception, Comprehension, and Projection). This article reveals how these three complementary layers of SAT can be aligned with three psychological concepts typical of good explanations (What ? Why ? What if ?). Thus, the generalization of this idea requires that the task be broken down and aligned with cognitive processes such as those in SAT. The fifth layer, "The Classifier Agent," can be composed of either an inherently interpretable model or a black box model, depending on the task's requirements. The ML specialist must design the appropriate classifiers and explainable models to meet the system requirements (content, format, timing). In our case study, the inspector will need a post hoc explanation of the model's defect classification to apply the correct tolerance thresholds for the corresponding defect class. This can be achieved through visualization and surrogate approaches [441]. For a diagnostic task, the user might need full transparency on the sequence of events that led to a specific outcome, which requires more interpretable models such as a decision tree. From a Human-AI Teaming perspective, the user may need only a tiny fraction of explanations to accomplish other tasks in parallel. Thus, the AES can support evaluating information needs for multiple automation scenarios.

7.5.4 Limitations, Research Avenues and Conclusion

We recognize the limitations of this work in demonstrating how the effectiveness of the AES can be measured, particularly user-perceived quality factors [442]. This paper focuses on defining the explanation space, and we plan to validate its utility by conducting evaluation-based research with relevant quantitative and qualitative measures. The metrics will encompass the performance of the technical system, the human, and the human-AI team during

simulation-informed activities. We also recognize that the current proposal may change by incorporating additional layers or modifying existing ones. For example, new forms of advanced human-machine interactions are emerging with haptic devices and natural language communication. These new technologies offer new possibilities that could change the third line of the AES : interface. This line represents the communication channel between users and the XAI, regardless of the interaction modality chosen. Thus, we contend that the five pillars of the framework constitute the foundation of the explanation space. The framework presented here is intended to be generalizable to other work contexts. Although it contributes to user-centered methods for developing tailored explanations, there are still open questions that constitute avenues for future research such as the following : “Was the level of detail satisfactory to end-users?” “Did it improve the human performance or the joint human-AI performance?” “Was the presentation format (e.g., visual analytics provided by LIME or SHAP) appropriate for the continuation of operational tasks?” As with any design material, the explanation requirements derived from the AES must be rigorously assessed in simulation-based activities [368]. An iterative loop with end-users should validate the design concepts based on objective (performance data) and subjective (questionnaires) measurements [368]. We developed an artifact to support AI project teams in their initial conceptual work, which relates to answering questions such as “what needs to be done, how, and why?” For example, researchers and practitioners could use the emergent tool in the requirements elicitation phases of systems engineering [443], or in the initial “model development” phase of the AI life cycle [70].

To conclude, this paper introduced a user-centered framework for eXplainable AI (XAI) with its associated features and illustrated it using the case of aerospace industrial inspection. The framework relies on the Abstracted Explanation Space (AES) : a formative tool that defines an explanation space for designers of future XAI-based systems to aggregate social (end-users) and technical views when designing explanations. Indeed, little attention has been paid to the users who will receive the explanations and collaborate with artificial agents in operational environments. This paper offers the following contributions : (1) a proposed framework to systematically articulate the explanations that end-users require for a given task, along with the XAI features to develop ; (2) a presentation of the AES that allows cross-disciplinary dialogue between designers to determine the types of models and levels of explanation to align with users’ goals and tasks ; and (3) a demonstration of the framework/tool in a real-world application in the aerospace domain. In this way, the paper advances practical knowledge and interdisciplinary endeavors to shape technology development to meet human and societal needs.

CHAPITRE 8 DISCUSSION GÉNÉRALE

Cette section revient en premier lieu sur les objectifs de cette étude et synthétise le contenu des trois articles qui l'a compose. Ensuite, les liens entre articles que nous appelons "points de discussion intégrés" [444] seront présentés et contextualisés avec la littérature pertinente pour montrer les évolutions de notre modèle conceptuel et souligner les contributions de ce travail. Puis, les forces et limites générales de cette thèse seront abordées. Enfin, les implications théoriques et pratiques, ainsi que les futures avenues de recherche clôtureront cette section.

8.1 Objectifs de la thèse et synthèse des résultats

Rappelons que l'objectif de cette thèse est *d'explorer les moyens et possibilités de reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie dans les projets de digitalisation et d'automatisation (DA) industrielle*. En effet, ce travail s'inscrit dans les courants de recherche qui soutiennent l'importance de partir d'une compréhension approfondie des situations de travail pour enrichir les projets de DA par une perspective sur le travail [6, 56, 133, 297, 445, 446]. Plus qu'un enrichissement, l'ambition de cette thèse était aussi d'explorer comment cette base de connaissance sur le système de travail existant (contexte organisationnel, situations de travail concernées par la DA) et le contexte du projet de R&D (intentions du projet et besoins, jalons, méthodes et échéanciers poursuivis par les concepteurs) pouvait orchestrer une médiation digitale qui supporte, oriente et influence le processus et les contenus de conception dans une perspective plus anthropocentrée. Plus spécifiquement, le développement des objets digitaux (algorithmes, programmes informatiques, structures profondes), les possibilités de prise en compte de la sémantique du domaine (fonctions de travail, règles etc.) et la configuration du système de travail futur incluant la collaboration HT.

Ainsi, l'article 1 (chapitre 5) documente et cartographie l'activité d'inspection, notamment la dimension socio-cognitive qui n'est pas formalisée dans les procédures standards; et (2) montre comment transformer des données descriptives en objets de conception formatifs qui supportent le développement technique et l'intégration des ontologies du domaine dans les contenus de conception. Cette compréhension approfondie de l'activité d'inspection s'est orchestrée à travers une recherche-action de 16 mois sur le site industriel et en interaction continue avec les concepteurs du projet (bureaux corporatifs ou visioconférence). Nous avons mobilisé un ensemble de méthodes pour collecter et représenter simultanément les données pertinentes de l'activité d'inspection dans un format actionnable pour les concepteurs du dispositif technologique. En termes de résultats clés, nous avons illustré à travers plusieurs

représentations (modèles) empiriques les fonctions et processus macrocognitifs complexes des inspecteurs en situation de travail pour atteindre les résultats opérationnels, notamment les 36 variables décisionnelles qui modulent leur activité et leur rôle prépondérant dans le collectif de travail. Ces représentations étaient co-développées avec les développeurs du dispositif technologique pour s'assurer qu'ils puissent s'en servir dans leur lot de travail. Cet article contribue ainsi à étendre le rôle des ergonomes dans la conception de système en illustrant comment dériver les analyses de l'activité de travail en objets de conception (médiation digitale) centrés sur les contenus de conception du dispositif technologique.

L'article 2 (chapitre 6) s'inscrit en continuité de l'article 1, soit la médiation des analyses descriptives de l'activité de travail des inspecteurs en objets de conception, cette fois centrés sur la conception des futures situations de travail plutôt que sur les contenus digitaux seulement. Ainsi, l'objectif de cet article était de décrire les cycles d'intervention et les objets de conception développés pour transiter d'une vision axée sur la technologie uniquement à une vision axée sur le travail, incluant la technologie, les inspecteurs et le travail à réaliser. Cet article repose sur une approche *d'action design research* qui mélange recherche-action et sciences de la conception pour structurer les différents cycles concurrents de *diagnostic*, *conception* et *implantation* qui apparaissent dans des projets du monde réel. En termes de résultats, cet article documente les méthodes, outils et objets développés/modifiés permettant la mise en relation critique entre le système de travail existant (état actuel) et le système de travail futur (état souhaité). Cette mise en lien supporte un processus d'idéation qui a (1) permis d'anticiper et quantifier le "fossé de capacités technologiques", soit les capacités du dispositif technologique à remplir les exigences opérationnelles de manière autonome. Cette constatation a amorcé la transition vers une conception plus "axée sur le travail", qui positionne humain et technologie dans des logiques de travail coopératives pour atteindre les objectifs. L'usage modifié de la table d'interdépendance en outil de co-conception permet d'intégrer les exigences du travail (tâches, sous-tâches, capacités requises, contraintes du domaine), les capacités technologiques et humaines et les agencements HT pour atteindre les résultats. La formalisation de ces trois éléments ensemble supporte l'équipe de conception dans l'identification des problèmes de conception et les actions correctives à réaliser pour intégrer le système à la production (développement technique, design organisationnel ou formation).

L'article 3 (chapitre 7) prend une tournure différente. Il présente un cadre de conception (méthode et objet de conception) qui supporte la formalisation et l'intégration des études centrées sur l'analyse du contexte d'utilisation et de l'activité des utilisateurs avec le développement technique de l'IA explicable. Ce cadre a pour ambition de faciliter le travail collaboratif et les communications entre acteurs de ces deux disciplines qui ont besoin de coopérer pour développer des explications pertinentes du point de vue de l'utilisateur. La méthodologie em-

ployée se caractérise par plusieurs itérations entre des phases d'induction provenant de notre étude de cas en inspection industrielle et de déduction (revue de littérature) pour extraire les différents éléments qui composent le cadre de conception et administrer une méthode pour le déployer. En termes de résultats, cet article fournit des orientations conceptuelles, informées par des preuves empiriques et des construits théoriques sur l'IA centrée humain, et méthodiques pour soutenir les concepteurs dans l'alignement du choix des modèles selon les besoins explicationnels des utilisateurs. Les besoins "explicationnels" sont définis en termes de contenu, format et timing de présentation et suivent le travail cognitif à réaliser et le modèle de conscience situationnelle (quoi ? pourquoi ? et si ?) [159]. L'article fournit ensuite un exemple d'application du cadre de conception pour la tâche de classification des défauts en inspection industrielle, ainsi que des recommandations pour généraliser la méthode à d'autres contextes.

8.2 Points de discussion intégrés

8.2.1 Inspection industrielle

La première contribution théorique de cette thèse est liée à une compréhension plus approfondie et une représentation schématisée de l'activité d'inspection industrielle [312], notamment la mobilisation et l'application de connaissances tacites dans les pratiques quotidiennes [6], les aspects collaboratifs, et l'influence des contraintes du domaine sur les fonctions et processus macrocognitifs [230, 321]. En effet, nous contribuons à ouvrir la "boite noire" des phases d'inspection de *Drury* [317] par l'analyse de l'activité d'inspection (et non la tâche), en documentant notamment comment les inspecteurs acquièrent, interprètent et génèrent des connaissances pour prendre des décisions éclairées dans leurs pratiques quotidiennes (article 1). Les résultats des articles 1 et 2 indiquent pourquoi il est si difficile d'automatiser des portions de ce travail et ses variables décisionnelles, et pourquoi vaut-il mieux recourir à un paradigme de conception plus anthropocentée qui met en avant la collaboration HT pour s'assurer que toutes les fonctions de travail et les variables décisionnelles soient couvertes et réintégrées dans un tout commun. Et ce, en tenant compte des capacités de chaque entité pour répondre aux exigences de travail, de l'interdépendance entre les opérations/tâches et des contraintes du domaine (p. ex. la décision finale doit rester humaine selon les contraintes législatives en vigueur dans la maintenance de pièces d'aéronef). Enfin, l'article 3 montre comment organiser et présenter les besoins "explicationnels" de l'opération de classification des défauts (si celle-ci est complètement automatisée par une IA) dans une structure cohérente qui suit la logique opératoire des inspecteurs pour qu'ils restent dans la boucle de contrôle.

8.2.2 Orchestration d'une médiation digitale axée sur le travail dans un projet de DA

Cette thèse a des contributions théoriques, empiriques et pratiques aux corpus de connaissances sur la conception "axée travail" (*work-centeredness* [127] ou *work-driven approach* [13, 56, 368]), l'intégration des facteurs humains et organisationnels dans des projets de DA en milieu de travail [31, 112] et sur la médiation digitale [20, 117]. Cette sous-section souligne ces contributions à travers les trois composantes qui ont permis d'orchestrer une médiation digitale axée sur le travail.

Composante de médiation digitale #1 - Évolution du rôle de l'ergonome par une immersion simultanée dans les situations de travail et dans le contexte du projet de R&D

Nos travaux autour de l'orchestration d'une médiation digitale axée sur le travail contribuent à l'évolution du positionnement de l'ergonome dans les processus de conception de systèmes technologiques complexes [447]. Notamment, dans l'extension de ses possibilités d'action pour influencer le processus et les contenus de conception [248]. Nos résultats indiquent que cette extension est rendue possible par la double immersion simultanée dans les situations de travail et dans le contexte du projet de R&D conception, ainsi que l'étude délibérée des modalités de collaboration entre l'ergonome et les concepteurs (ingénieurs, développeurs et chercheurs). Ce combiné assure un interfaçage entre la *voix des utilisateurs* et la *voix des concepteurs*. Il n'est pas nouveau pour les ergonomes qui interviennent dans les projets de conception de servir de pierre angulaire entre les utilisateurs et les concepteurs [202]. L'innovation méthodologique de cette thèse repose sur un nouveau levier : celui d'une attention équivoque utilisateurs-concepteurs. En portant une attention supplémentaire sur les besoins des concepteurs (article 1 et 3) et sur les modalités de la collaboration ergonome-concepteur (article 1, 2 et 3), les mécanismes de transformation et d'intégration des résultats de l'analyse de l'existant dans les structures profondes du dispositif technologique sont facilités, ce qui permet d'influencer le processus et les contenus de conception [202, 248]. Notre travail a quelques chevauchements avec *Village et coll.* [448] qui montrent que c'est par une acclimatation et un alignement avec les outils, langages et processus propres à l'ingénierie de conception que les spécialistes en facteurs humains comprennent comment leurs données peuvent s'intégrer en conception et contribuer aux objectifs d'ingénierie. Nous ajoutons que cette acclimatation passe nécessairement par (1) l'acquisition de connaissances techniques pertinentes sur le système ou la technologie en cours de conception, (2) la génération de connaissances sociotechniques par la mise en relation entre la technologie, la sémantique du domaine et le travail à réaliser (tâches et exigences, règles institutionnelles, contraintes du domaine, de-

mande opérationnelle). Cette affirmation implique non seulement que la double immersion concerne l'acquisition de connaissances opérationnelles et de connaissances de conception (*design knowledge*) pertinentes, mais aussi leur articulation dans une structure cohérente et actionnable selon les objectifs d'ingénierie poursuivis :

- L'article 1 illustre ce phénomène en montrant comment les représentations empiriques produites découlent de l'articulation de connaissances sur l'activité d'inspection, sur le contexte organisationnel (ou domaine de travail) et de connaissances de conception pour supporter la production ou l'amélioration des objets digitaux
- L'article 2 illustre l'aspect de génération de connaissances sociotechniques et de mise en relation avec le construit de "couverture technologique" et l'usage modifié de la table d'interdépendance
- L'article 3 propose un cadre pour faciliter ces efforts d'articulation et de structuration

Composante de médiation digitale #2 - Mécanismes collaboratifs et espaces de co-conception axés sur le travail

En continuité du point précédent, nos résultats fournissent des contributions empiriques au corpus de connaissance peu abondant sur la collaboration ergonome-concepteur dans des projets réels de DA. En effet, ils montrent comment cette collaboration s'est co-construite autour d'artefacts tangibles pour représenter et projeter les structures du dispositif technologique et les caractéristiques du système futur de travail. *Recker et coll* [20] ont développé un nouveau cadre théorique qui met en avant les modèles conceptuels (*conceptual modeling scripts*) comme médiateurs pour transiter entre les réalités physiques et digitales. Les trois articles de cette thèse ont montré, à travers l'enrichissement ou la génération de nouveaux artefacts de conception, comment cette médiation digitale pouvait être orchestrée dans des équipes de conception interdisciplinaire [55]. Les objets de conception des trois articles ont fourni un support cognitif et opératoire pour structurer le travail collaboratif de conception autour d'une représentation commune de la situation actuelle qui intègre une perspective sur le travail. Cette contribution résonne à nouveau avec les travaux de *Village et coll.* [448] qui expliquent que les outils de l'ingénierie de la conception ont été adaptés pour intégrer les aspects humains dans un projet d'amélioration des lignes d'assemblage. Cependant nos travaux étendent cette perspective puisque les outils et objets de conception développés dans ces trois articles contribuent à la transformation des aspects du "monde physique" et du "monde digital" [20]. En effet, il a été nécessaire de construire de nouveaux outils et objets de conception, et d'étendre la portée de ceux qui existent déjà, pour aborder l'espace-problème des projets d'industrialisation 4.0/5.0. (p. ex. collaboration HT). Parallèlement, il est en effet intéressant de constater comment la présentation, l'articulation et la projection de données

sur le travail, ainsi que leurs mises en relation avec le dispositif technologique dans des objets de conception, ont contribué à affaïsser les fixations de conception technocentrique [284] et enrichir l'espace de conception [449–451] par la mise en avant de la collaboration HT pour atteindre l'état final souhaité. Ultimement, cet enrichissement amorce une transition vers une approche de conception "axée sur le travail". Le contenu des articles décrit comment cela a été fait (articles 1 et 2) ou comment ça peut être fait (article 3) et fournit des repères pour le transfert des éléments pertinents à d'autres contextes ou projet de DA.

Composante de médiation digitale #3 - Résultats et effets du travail collaboratif dans les espaces de co-conception

Questionner et co-concevoir les réalités digitales. Nos travaux ont permis d'interroger la conception des éléments qui composent le "monde digital" par des objets de conception tangibles. Étant donné que des décisions impactantes sont prises durant la conception algorithmique [452], il faut que les chercheurs en HF&E puissent se saisir de cette réalité digitale qui va avoir une influence majeure sur le travail futur. Cela ne veut pas dire que les ergonomes doivent poursuivre des formations en science des données, mais qu'ils doivent développer des mécanismes de communication et de collaboration dans le processus de conception pour accéder à cette compréhension sans forcément avoir un *background* en informatique. Nous avons outillé cette possibilité par un recadrage fonctionnel et schématique de la technologie ; ce qui a ultimement permis de contextualiser notre compréhension des capacités technologiques selon les exigences du travail afin d'agir sur les structures et fonctionnalités du dispositif (articles 1, 2 et 3). Ce recadrage fonctionnel est souligné par plusieurs auteurs non seulement comme levier au travail collaboratif dans les équipes interdisciplinaires, mais aussi comme support pour évaluer l'applicabilité et le fonctionnement potentiel de la solution dans le contexte d'application [13, 453, 454]. Dans l'article 1, nous avons collaboré avec l'équipe de recherche responsable du travail de la caractérisation des défauts en évaluant comment les paramètres distinctifs des défauts formalisés en "langage naturel" élicités auprès des inspecteurs pouvaient être représentés dans les caractéristiques de l'image extraient des algorithmes de vision artificielle (nombre de points du défaut, direction, point le plus profond, centre du défaut, axes d'inertie). Ce concept se retrouve évidemment en grande partie dans l'article 2 avec la médiation des analyses de l'activité de travail en spécifications fonctionnelles et en comparant ces fonctions avec les flux logiciels de SARA. D'ailleurs, ce combiné méthodologique trouve quelques points de résonance avec *Kitchin et coll* et *Bailey et coll.* [455, 456] qui proposent un panorama de méthodes pour étudier la constitution des algorithmes, comme les interviews avec les concepteurs. Dans la même lignée, notre étude résonne aussi avec *Lebovitz et coll.* [37] qui ont comparé les procédés humains et artificiels pour diagnostiquer l'état d'un

patient suite à des décalages observés entre les deux entités. Cependant, notre méthodologie permet d'anticiper ces divergences durant la conception alors que *Lebovitz et coll* font un état des lieux post-implémentation, quand le système est déjà opérationnel (ce qui engendre des coûts supplémentaires). Notre apport se situe à nouveau dans la mise en correspondance du couplage technologie-travail dans une logique d'action (propre au positionnement épistémologique de l'ergonome [457]), et ce avant le déploiement opérationnel.

Qualifier et quantifier le rôle futur des inspecteurs. L'anticipation des limites technologiques et la (re)configuration des situations de travail soulignent aussi l'apport réel des technologies dans les situations de travail. Nos résultats font ressortir le rôle prépondérant des inspecteurs dans le futur système de travail. Nous avons identifié au moins quatre autres rôles supplémentaires qu'ils devront assumer simultanément :

- Rôle de soutien : l'inspecteur assurera une fonction support auprès de SARA pour qu'elle puisse opérer, que ce soit au niveau des opérations logistiques (manutentionner les pièces à l'intérieur de la cellule), de configurations (sélectionner le bon programme d'inspection à lancer), de soutien aux capacités manquantes sur une même opération (définir si les défauts apparaissent dans une zone restreinte), appelée dépendance opérationnelle ou "forte contrainte" [63]
- Rôle de surveillance (vigilance et attention "partagée") : l'inspecteur va devoir partager son attention entre ses portions de travail et la surveillance du bon fonctionnement de la technologie. Cela implique évidemment la gestion des alertes, mais aussi des dépendances opérationnelles
- Rôle de collaborateur : En plus des opérations de support technologique que devront réaliser les inspecteurs, ils devront en parallèle réaliser un ensemble de sous-tâches pour s'assurer que le diagnostic posé par le dispositif est correct. Par exemple, ils devront traiter les variables décisionnelles dont SARA ne tient pas compte (application de connaissances contextuelles [10]) ou continuer d'optimiser le processus de réparation selon l'historique de la pièce, les contraintes de réparation ou encore les opérations déjà prescrites susceptibles d'enlever le défaut (projection et compréhension générale de la décision sur le système)
- Rôle de décideur : l'inspecteur confirme ou infirme la décision prise par le dispositif technologique et modifie le cours d'action. Par exemple, il peut revoir le diagnostic posé par SARA selon les informations contextuelles qu'il a relevé en parallèle.

Ainsi, il nous semble plus proche des réalités de définir le rôle des inspecteurs selon les sous-tâches, opérations à réaliser et leurs interdépendances plutôt que selon des taxonomies très génériques qui qualifient la relation humain-technologie ou le type d'interaction sans ancrage

opérationnel [189]. Par exemple, sur l'opération de classification des défauts, l'opérateur aura à exercer des rôles de soutien et de décideur à cause des limitations technologiques de SARA dans la classification des défauts de la même famille.

Configurations du travail futur. Les connaissances élicitées dans le système existant (article 1) et la médiation digitale (articles 1, 2 et 3) autour d'elles ont permis de configurer le futur système de travail. À la lumière de nos résultats, nous postulons que les caractéristiques (structures, états, propriétés, tâches, savoirs, acteurs, règles, interaction entre éléments) qui relient et/ou changent entre le système actuel et le système futur peuvent être analysés plus en profondeur à travers divers objets de conception en complémentarité des simulations du travail. C'est en ce sens que ces objets de conception outillent la médiation digitale pour que l'équipe de conception navigue à travers le golfe de conception [13]. Comme expliqué dans la revue de littérature, l'objectif n'est pas de modéliser une "décision particulière" (ou situation) mais plutôt de *saisir et de représenter les règles de décision*, les processus cognitifs et les contraintes du domaine qui *génèrent le flux de décisions* [225, p.2], et d'intégrer cette sémantique dans la conception du système futur et des structures de programmation. Les aspects d'organisation du travail comme la répartition et l'interdépendance des tâches, les flux d'information entre inspecteurs ou autres acteurs du système de travail ont pu être configurés à la lumière de la DA. Cette reconfiguration du travail chevauche les phases de conception et d'implémentation organisationnelle d'un dispositif technologique dans une perspective "axée sur le travail" (Figure 8.1). D'autres chercheurs ont également fait état des objets de conception comme soutien à la représentation, la validation et l'implantation des nouvelles configurations de travail envisagées [65]. Le cadre de conception de *Oppl* [65] vise à garantir que les fonctions et connaissances critiques - surtout celles non explicitées dans les procédures standards et qui émanent de l'expérience pratique - soient conservées dans les configurations de travail futures. Ils ne mettent cependant pas avant la collaboration HT comme moyen pour atteindre l'état final souhaité en cas de déficience technologique identifiée.

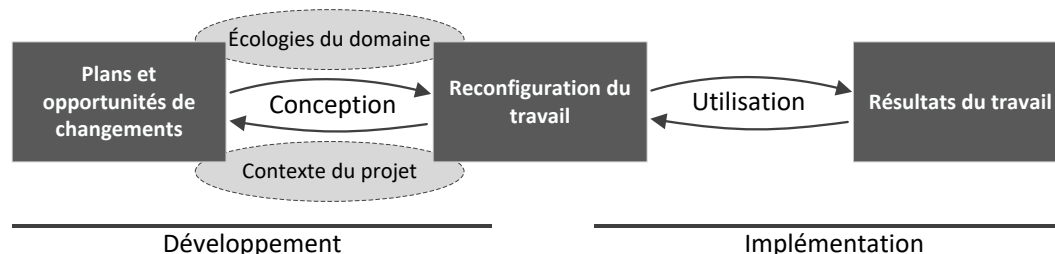


FIGURE 8.1 Perspective "axée sur le travail" de la conception et l'implémentation organisationnelle. Adapté de [27]

Nous rejoignons *Johnson et coll.* [61] en soutenant que la DA n'induit pas nécessairement une réduction de la charge de travail, mais plutôt un transfert de contraintes HT qui doit être délibérément étudié pour ne pas conduire à des configurations erronées ou non viables du travail futur. En anticipant les capacités du dispositif technologique avec un ancrage opérationnel, il est possible de faire des choix de conception (choix d'automatiser une fonction ou non selon le temps de travail requis et la valeur ajoutée finale de ce choix), d'orienter et prioriser les développements additionnels ou encore d'indiquer sur quelles autres composantes du système il faut travailler (développement organisationnel ou formation du personnel), et donc de guider plus efficacement les concepteurs. Par exemple, les opérateurs échangent énormément d'information via les cartes de travail digitales stockées dans le progiciel de gestion intégrée SAP. L'annexe C recense les informations échangées entre inspecteurs et opérateurs de plancher via SAP. Les capacités technologiques de SARA ne permettent pas de relier la technologie à ces bases de données, ce qui implique que l'inspecteur doit prendre en considération l'information contenue dans ces cartes pour guider les actions de SARA.

8.3 Limites générales de la thèse

Même si le contenu de cette thèse présente des contributions intéressantes, elle n'est pas sans limites. Premièrement, notre recherche propose des généralisations analytiques basées sur une étude de cas qualitative, plutôt que des généralisations basées sur des méthodes statistiques avec des échantillons conséquents [74, 458]. Ainsi, l'évolution du modèle conceptuel et les contributions présentées plus haut sont à interpréter au prisme de cette information. La généralisation des résultats empiriques dans l'objectif de formuler une théorie devrait ainsi passer par la réalisation d'études de cas subséquentes dans des configurations relativement similaires (p. ex. en milieu de travail) et à la recherche de phénomènes empiriques convergents (ou *empirical regularities*) [459]. Ou encore, en passant par l'administration de protocoles expérimentaux en laboratoire qui se focalisent sur des aspects de cette recherche [458]. Par exemple, il nous semble pertinent de pouvoir éventuellement simuler expérimentalement des espaces de médiation ou définir des métriques qui mesurent leur efficacité. Cependant, il est possible de dégager des orientations générales (transférables) de ces recherches terrain très contextuelles, sous la forme de principes de conception pour une classe de problème générale [336], que nous détaillons dans la sous-section suivante.

Une deuxième limite associée à cette thèse concerne l'absence d'évaluation sommative semi-expérimentale du dispositif technologique. Des résultats quantifiés sur l'utilité et l'utilisabilité de SARA ne sont pas encore disponibles. Nous argumentons cependant que la méthodologie d'*action design research* employée dans cette thèse préconise plusieurs évaluations forma-

tives (p. ex. les *focus group* multidisciplinaires) tout au long du processus de conception. Premièrement, les méthodes d'analyse de l'activité de travail et leur modélisation ont suivi des boucles de validation rigoureuses avec les acteurs concernés (opérateurs et concepteurs) et de la triangulation afin d'évaluer l'exactitude des phénomènes modélisés, surtout des processus cognitifs profondément ancrés et automatiques. Ainsi, l'ergonome est un acteur de la conception qui porte un pan de l'expertise pratique de l'utilisateur, utile pour le développement technologique [460]. Par ailleurs, les objets de conception sont des abstractions du dispositif technologique à différents niveaux qui permettent aux concepteurs d'évaluer l'état des objectifs de conception [22] et son "authenticité" [336], soit "l'intégrabilité" de la solution par rapport au contexte d'utilisation et à l'activité des utilisateurs. Ainsi, ces apprentissages guident la conception, l'évolution et l'implémentation continues de la solution proposée, ce qui complète les évaluations plus formelles qui peuvent parfois être difficiles à conduire dans des contextes naturels [22, 336]. Nous reconnaissons tout de même la limite de l'absence de simulation sur prototypes pour valider les exigences de réalisation du travail futur avec les acteurs concernés.

Troisièmement, les utilisateurs finaux (inspecteurs) du dispositif technologique ont été "intégrés" à la conception via le recueil, la représentation (comprenant des étapes de validation) et la médiation de leur activité de travail dans les contenus et processus de conception. Par manque d'opportunités, il n'a malheureusement pas été possible de les convier directement dans les ateliers de conception. Cette intégration "physique" des utilisateurs dans l'espace de co-conception sera intéressante à développer dans des recherches futures, autant pour la production des objets de conception que pour les simulations sur support tangible (maquettes).

8.4 Apports théoriques

8.4.1 Évolution du modèle conceptuel

Les points de discussion intégrés de la sous-section précédente soulignent les contributions théoriques, empiriques et "artefactuelles" [461] de cette thèse. La Figure 8.2 schématise visuellement nos apports et les enseignements sur les évolutions à apporter au modèle conceptuel présenté à la fin de la Section 2. Nous ajouterons trois points subséquents. Premièrement, l'évolution du modèle conceptuel via nos données empiriques est marquée par l'apparition d'un *espace de médiation*. Cet espace symbolique fournit un lien critique entre le système existant et le système futur pour naviguer à travers le golfe de conception [13]. Le travail collaboratif entre les acteurs de la conception est médié par les objets de conception qui matérialisent les ontologies du domaine, l'activité de travail (présente et future), les structures

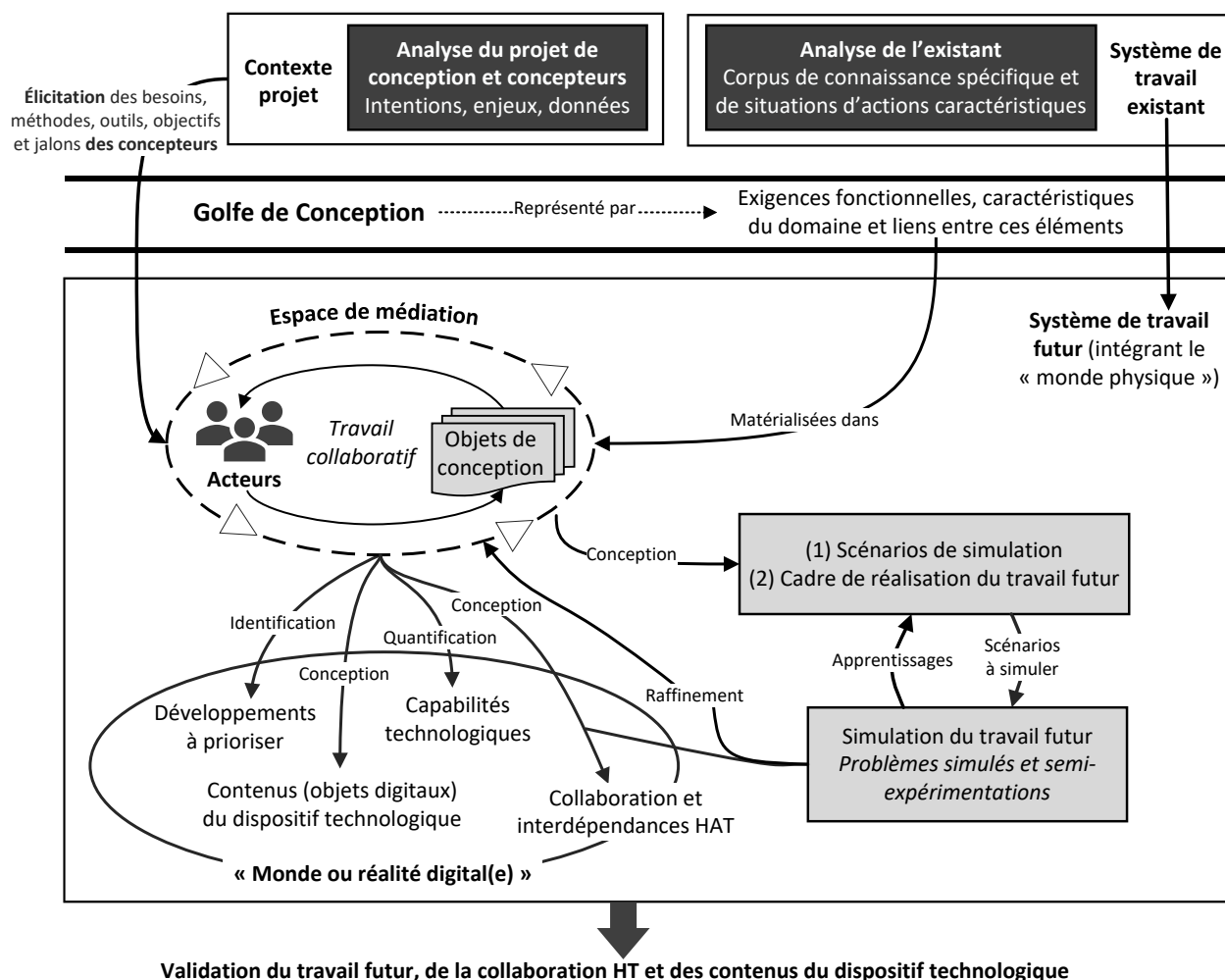


FIGURE 8.2 Contributions et évolution du modèle conceptuel avec les résultats empiriques

matérielles et logicielles du dispositif technologique et les intentions de conception. Cet espace de médiation est ainsi un lieu d'alignement de la solution proposée avec les ontologies du domaine qui se traduisent par des actions d'optimisation (collaboration HT), de négociation de compromis (p. ex. entre éléments de faisabilité technique et logiques opératoires dans le domaine), de priorisation et d'extension des développements technologiques et organisationnels pour concevoir et implémenter le dispositif technologique à la production.

Deuxièmement, nous soutenons qu'il existe des points de résonance entre les réalités physiques et digitales. La médiation amorce nécessairement des va-et-vient dans les deux réalités : du physique au digitale mais aussi du digitale au physique. Nous illustrons cette affirmation à la Figure 8.3 avec les opérations de caractérisation et classification des défauts. Les médiations physique-digitale servent à traduire et incorporer les propriétés du monde physiques dans les structures digitales. Les médiations digitale-physique visent la compréhension de la manière

dont les propriétés et structures des objets digitaux modulent les événements du monde physique, et ce pour les modifier en conséquence.

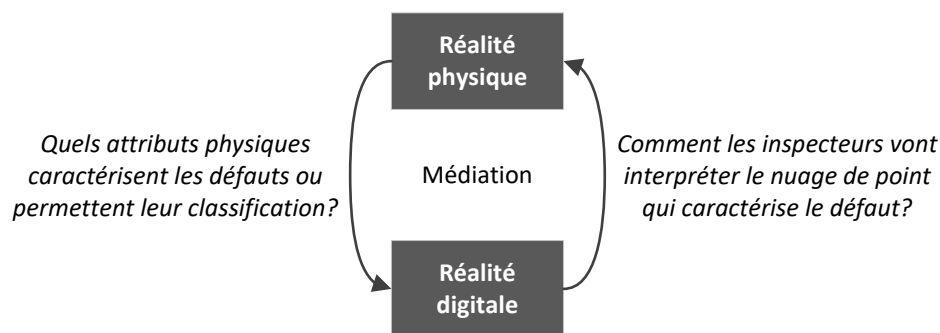


FIGURE 8.3 Exemple de médiations physique-digitale et digitale-physique

Enfin, la mise en relation entre les connaissances sur l'activité de travail / le domaine de travail et les connaissances de conception permettent d'émettre des hypothèses sur l'influence des fonctionnalités technologiques sur le travail futur afin d'identifier des dysfonctionnements potentiels (Tableau 8.1). De plus, cette articulation des connaissances permet d'identifier, définir et prioriser des scénarios de simulation. En effet, les potentiels points de vigilances, notamment les dépendances opérationnelles à forte contrainte (*hard constraint* [61]) ou la réalisation des fonctions critiques sont des éléments qui peuvent motiver les équipes de conception à émuler ces caractéristiques dans des scénarios réalistes durant des semi-expérimentations [368]. Nous avons initialement développé des protocoles semi-expérimentaux qui rassemblent certains des points critiques et des dépendances opérationnelles identifiées (Tableau 8.2) pour mettre en évidence certaines hypothèses avancées dans le Tableau 8.1. Compte tenu du contexte industriel (*lock out*), il n'a malheureusement pas été possible de les opérationnaliser. Ils constituent cependant des points de discussion intéressants susceptibles de susciter des travaux futurs de recherche.

TABLEAU 8.1 Hypothèses de couplage humain-technologie-environnement

#	Fonctionnalité SARA	Hypothèses
H1	Cartographie des zones	La cartographie des zones de la pièce ne supporte pas le modèle mental des inspecteurs (2D et 3D) et nécessite des opérations cognitives supplémentaires pour repositionner le défaut dans l'espace
H2	Affichage des mesures	L'affichage des valeurs dimensionnelles actuelles demandent un travail d'interprétation supplémentaire important, que ce soit pour naviguer à travers l'interface que pour convertir les unités de mesures
H3	Interface et transparence	La configuration actuelle de l'interface renforce un comportement de complaisance de l'inspecteur par manque de transparence sur les variables décisionnelles prises en compte par le dispositif technologique
H4	Validation des résultats	L'onglet « Validate Results » ne rassemble pas toutes les informations nécessaires pour que l'inspecteur puisse facilement changer le résultat
H5	Fonction hybride : classification des défauts	Le système actuel ne donne pas la possibilité aux inspecteurs de modifier la classification des défauts. Si le système humain-machine rencontre une situation où une classification fine des défauts est requise, alors le diagnostic sera erroné
H6	Installation de la pièce	Le procédé d'installation des pièces dans un gabarit nécessite énormément d'ouvrage répétitif et fastidieux. Cela limite l'usage systématique du dispositif technologique sur toutes les pièces de production et renforce un usage épisodique

TABLEAU 8.2 Exemples de situations d'inspection difficiles/complexes qui peuvent informer la conception de scénarios de simulation

Situations complexes	Description
1) Application de plusieurs procédures globales et locales pour un même défaut	Pour une même situation, les inspecteurs doivent regarder les seuils de tolérance de l'Engine Manual (SOPs) en plus certaines procédures locales (LOPs), ce qui peut générer des boucles décisionnelles complexes
2) Compenser les limites des procédures en cas de configuration de défauts inexistante	Certains défauts peuvent survenir à des endroits dans lesquels aucune procédure prédéfinie ou plan n'existe. Cette inexistence de procédures va générer beaucoup de questionnements et de projection mentale pour compenser cette limite, ou engendrer l'envoi de la pièce au MRB
3) Interpréter des variables décisionnelles concernant l'historique de la pièce (e.g., réparations réalisées)	Une pièce ou un lot de pièces peut avoir plusieurs visites à l'atelier. Des opérations de réparations ont déjà été réalisées sur les pièces, et certains schémas de réparations ne peuvent être appliqués qu'un certain nombre de fois. Cette évaluation peut générer beaucoup de prises d'information, de construction de sens (meaning-making) et altérer la décision finale
4) Défauts dans des zones non autorisées	Certaines zones critiques de la pièce doivent être exempts de défauts. Les inspecteurs doivent s'assurer qu'aucun défaut ne se trouve directement dans la zone concernée (p. ex., Critical Filet Radius ou CFR) ou alors qu'un défaut d'une zone adjacente s'étende dans la zone non tolérée

8.4.2 Principes pour une médiation digitale "axée sur le travail"

Pour permettre la transférabilité des résultats de cette recherche-action, nous suivons les étapes proposées par *Sein et coll.* [336] pour dériver des composantes situées (*specific-and-unique*) en principes génériques de conception (*generic-and-abstract*). La première étape consiste à dériver et assigner le problème de conception à une classe de problème générique. La deuxième étape vise à faire la même chose pour les solutions formulées, soit les assigner à une classe de solution générique. Enfin sur la base de cette généralisation, la 3ème étape *nécessite de reconceptualiser l'apprentissage à partir de la classe de solution spécifique en principes de conception pour une classe de solutions* [336, p.45]. Le Tableau 8.3 formalise les deux premières étapes de généralisation sur lesquelles reposent les six principes de conception présentés ci-dessous.

TABLEAU 8.3 Classes de problème et classes de solution

	Classe de problème	Classe de solution
Contexte du projet SARA (<i>specific-and-unique</i>)	Développement technologique d'un système robotique pour automatiser certaines tâches d'inspection industrielle qui suit initialement une approche de conception technocentrique ne tenant pas entièrement compte des caractéristiques du domaine (ontologie) et de l'activité d'inspection	Développement d'outils, d'objets et de cadres de conception qui incorporent finement les caractéristiques du domaine et l'activité de travail d'inspection dans les contenus techniques de conception afin de : (1) s'assurer que le système futur couvre la variabilité opérationnelle qui n'apparaît pas dans les procédures standards (2) générer des résultats fiables (3) éviter les phénomènes "d'inadéquation des attentes" (<i>expectation mismatch</i>) entre procédés manuels et semi-automatisés (4) créer les conditions acceptables et les ressources favorables pour l'adoption et l'intégration du dispositif technologique dans les pratiques quotidiennes
Généralisation (<i>generic-and-abstract</i>)	Orientation technocentrique des projets de conception et d'implémentation de technologies digitales en milieu de travail	Approches, outils et méthodes de conception "axée sur le travail" qui mettent en relation technologie, contexte d'utilisation et activité future des utilisateurs
Références connexes	[31, 32, 51, 68, 84, 107, 117, 118]	[56, 62–64, 82, 112, 248, 368, 448]

Principe 1 - *Construction sociale avec toutes les parties prenantes (utilisateurs finaux, concepteurs, chercheurs, gestionnaires ou représentant du personnel)*

Il est primordial pour mener à bien un tel projet d'accompagnement ou de transition "axée sur le travail" d'instaurer une relation de confiance avec les parties prenantes, en expliquant

les modalités de la recherche-action et en insistant bien sur la plus-value du travail poursuivi. Il est naturel de retrouver certaines formes de résistances (craintes etc..) qu'il sera important de comprendre et de "désamorcer" [462]. Par exemple, dans le projet SARA, les concepteurs n'avaient pas pour habitude de travailler avec un spécialiste en facteurs humains et montraient des préoccupations quant à notre intervention dans leurs lots de travail. C'est en expliquant précisément notre rôle, nos moyens d'action, et surtout, en présentant comment nos données peuvent supporter leurs tâches de conception (à condition de co-développer un mécanisme de partage (section 8.2.2)) que nous avons gagné leur confiance. Même chose avec les inspecteurs : la cartographie et la formalisation de leur activité de travail, en comparaison avec les capacités technologiques de SARA, et le fait que le projet se concentrait uniquement sur seulement trois pièces d'aéronefs, ont permis de réduire leurs préoccupations (être remplacé par le dispositif technologique) pour co-construire des connaissances sur leur activité tout au long du projet. Enfin, avec les questionnaires et encadrants du travail, il faut être en mesure de négocier les conditions d'accès sur le terrain, de collecte et d'interprétation de données. Par exemple, insister sur le fait que l'observation des opérateurs en situation de travail n'occasionne pas d'arrêt de production.

Principe 2 - *Immersion simultanée dans les situations de travail, le contexte du projet et la littérature scientifique pertinente*

L'immersion simultanée dans plusieurs sphères qui délimitent le projet vise à recueillir des données contextuelles pour construire et organiser des connaissances essentielles pour la conception de la technologie (Figure 8.4) :

1. Base de connaissances spécifique au domaine (*Domain-specific knowledge base*) : ensemble de connaissances reliées au contexte d'utilisation (objectifs du domaine de travail, différents acteurs, procédures, contraintes législatives et temporelles etc.) ainsi qu'à l'activité de travail des utilisateurs finaux ciblés par le projet de transformation (dimensions physique, cognitive et sociale)
2. Base de connaissances sur le projet (*Project knowledge base*) : ensemble de connaissances reliées au projet de conception et aux acteurs qui le compose, soit le problème initial, les enjeux chiffrés, les intentions du projet et les solutions technologiques envisagées. Cela touche aussi les concepteurs, leurs besoins, jalons, les méthodes qu'ils utilisent etc...
3. Base de connaissances fondamentale (*Foundational knowledge base*) : ensemble de connaissances théoriques, méthodologiques et pratiques issues de la littérature scientifique qui sont utiles pour le projet en question. Il est aussi encouragé de faire état de l'art sur le travail où les situations de travail sujet au changement (p. ex. l'inspection industrielle

dans notre cas) et de regarder certains principes méthodologiques qui guideront l'action (p. ex. animer des *focus group* interdisciplinaires et interpréter les données recueillies)

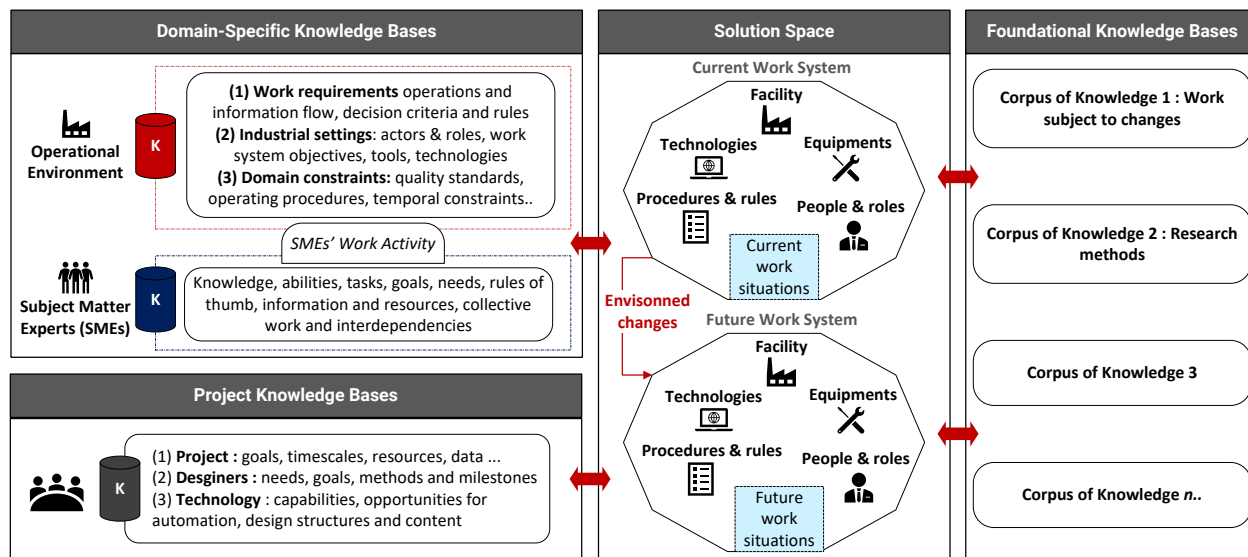


FIGURE 8.4 Bases de connaissances pour l'immersion simultanée

Principe 3 - Articulation, transformation et traduction (médiation) des connaissances en objets de conception

Le principe précédent se concentrait sur le recueil et l'organisation de données utiles à la conception. Celui-ci se distingue par la nécessité de mettre en relation les trois bases de connaissances générées afin d'identifier des points de convergence qui justifient la transformation des connaissances sur l'activité et le domaine de travail en objets de conception. En effet, l'analyse de l'existant produit des connaissances localisées sur le fonctionnement, les critères et l'organisation des schémas d'action en vue de répondre aux objectifs et exigences du travail qui subsisteront dans le système futur semi-digitalisé [13,460]. Ces connaissances, à condition de subir des transformations appropriées, deviennent des leviers d'intégration de la sémantique du domaine (exigences fonctionnelles, propriétés du domaine de travail et liens entre ces éléments) dans les contenus de conception. La mise en relation de ces connaissances passe par des efforts itératifs de collecte, d'alignement et de représentation des données qui satisfassent les acteurs de la conception (Figure 8.5). Du point de vue des développeurs, les objets de conception produits doivent se retrouver dans un format actionnable, nécessitant le moins d'interprétation et de traduction possibles pour les incorporer dans son lot de travail. Les modélisations UML et SysML [463], la co-génération de *pseudo-codes* [464], les arbres décisionnels sont des formalismes à privilégier. Du point de vue de l'ergonome, la représentation des réalités opérationnelles ne doit pas être perdue dans le processus de médiation [233,465].

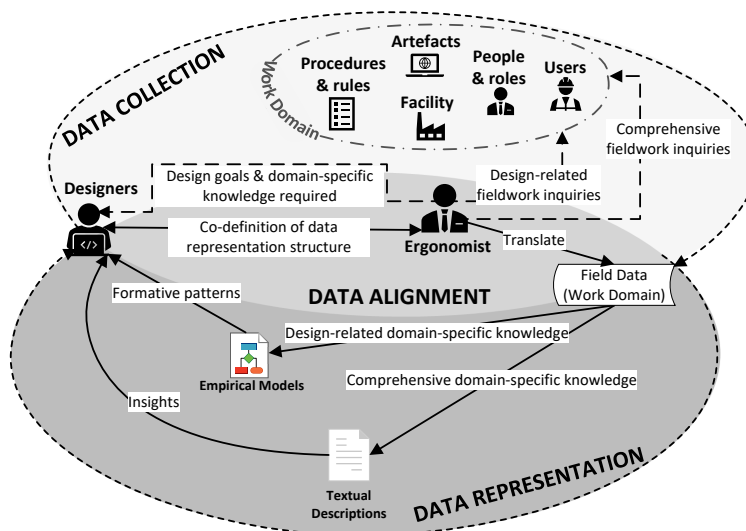


FIGURE 8.5 Le rôle triadique des ergonomes dans la conception des systèmes. Tiré de [28]

Principe 4 - Prévoir, planifier et outiller les espaces de médiation

Afin de permettre une médiation digitale entre acteurs de la conception, il est nécessaire d'organiser des espaces de rencontre interdisciplinaire dans le cadre de la gestion de projet. Cela sous-entend aussi d'identifier dans les échéanciers de projet des moments prévus à cet effet. Ces espaces de médiation supportent la génération et le maintien d'un référentiel commun sur le travail et la technologie. La génération d'un référentiel commun peut passer par des méthodes génératives. Par exemple, dans le projet SARA, plusieurs rencontres ont eu lieu entre les développeurs et l'ergonome pour assurer une meilleure compréhension de la technologie par ce dernier : démonstration commentée du dispositif technologie, entrevues, modélisation et validation du flux logiciel (Annexe D). De la même manière, les espaces de médiation doivent s'appuyer sur des supports tangibles pour permettre et faciliter le travail collaboratif que ce soit sur des aspects logiciels, matériels ou sur le travail futur.

Principe 5 - Le passage de la situation actuelle à la situation souhaitée (*desired end state*) est imaginé dans des logiques de collaboration humain-technologie

La situation souhaitée doit être imaginée (*envisioned*) autour de la triade humain-travail-technologie. Cela va au-delà des principes de conception "anthropocentrée" et se rapproche plus de la vision défendue par *Johnson et coll.* [61] de *teamwork-centered* ou d'intelligence collective humain-technologie de *Peeters et coll.* [54]. Cependant, les conditions et le cadre de réalisation du travail doivent guider la conception des futures situations de travail en équipe humain-technologie. Une attention équivoque doit être portée sur les facteurs techniques,

humains et organisationnels (Figure 8.6). La *vision technologie* peut être approchée par la méthode de couverture technologique présentée dans l'article 2 selon les étapes suivantes :

1. Analyse des situations de travail sujettes au changement
2. Dériver les sous-tâches et opérations réalisées dans une table qui spécifie les exigences fonctionnelles pour réaliser le travail de manière autonome
3. Déterminer dans des groupes de travail la possibilité d'automatiser chacune de ces fonctions selon la faisabilité technique, les contraintes du projet (temps, coûts) et la plus-value apportée par une automatisation
4. Déterminer la nature des fonctions : automatisable en partie, complètement automatisable, pas automatisable
5. Déterminer le taux de fonctions automatisables et hybrides

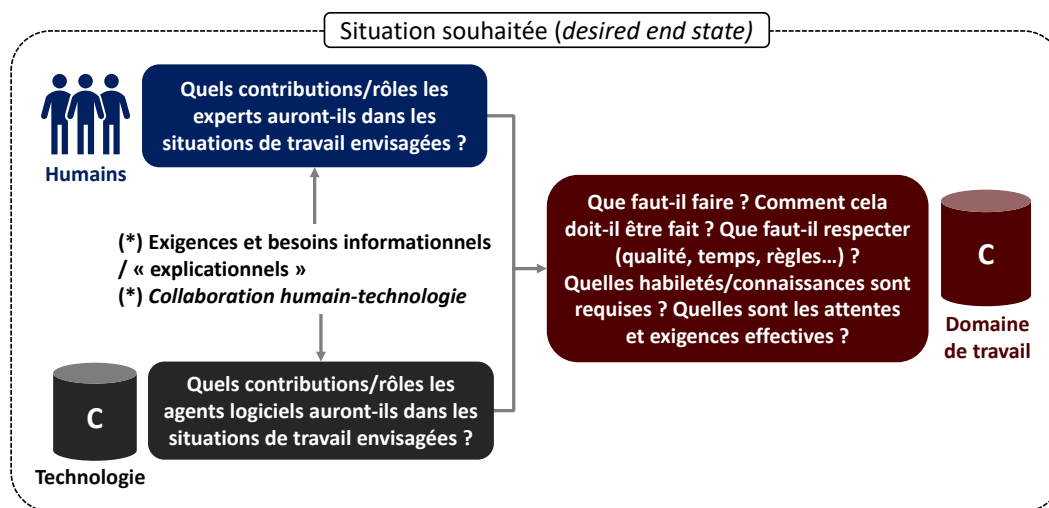


FIGURE 8.6 Agrégation des trois pôles dans la configuration des logiques de collaboration humain-technologie

La conception des situations de travail via la table d'interdépendance (article 2) peut aussi être réutilisée pour fournir le lien critique entre situation actuelle et future avec les connaissances de conception générées durant le projet. Il faut garder à l'esprit que l'attribution d'une fonction à l'humain ne doit pas simplement compenser une limite technologique, mais aussi s'appuyer sur un réel débat portant sur l'importance de maintenir l'humain dans la boucle de décision. Il peut être techniquement faisable d'automatiser une fonction, mais l'équipe de conception peut décider de ne pas aller de l'avant. Cela peut être motivé par des raisons éthiques, législatives, opérationnelles, organisationnelles comme l'impossibilité déontologique de reposer uniquement sur une IA dans les diagnostics médicaux. Ainsi, une profonde compréhension du domaine de travail (Principe 1) et une abstraction intelligible de ces composantes

importantes pour la conception - sous la forme de représentations empiriques (Principe 3) - supportent ces décisions multi-niveaux.

Principe 6 - Identifier, évaluer et surveiller les points de vigilance sur la collaboration HT et les autres aspects du système de travail

Les points de vigilance peuvent concerner toutes les propriétés des nouvelles situations de travail. Au niveau de la collaboration HT, les points de vigilances identifiés pendant la conception peuvent être :

- Les dépendances opérationnelles à fortes contraintes ou les capacités partielles d'une entité sur une fonction
- Le passage d'une fonction humaine à une fonction technologique
- La réalisation d'une tâche critique, la transmission des bonnes informations entre entités, etc.
- L'évaluation de plusieurs scénarios opérationnels et d'alternatives possibles pour réaliser une même tâche en cas de situations imprévues

Les points de vigilances peuvent aussi concerner les effets sur le système de travail comme l'organisation du travail (p. ex. l'effet de l'automatisation sur les postes en amont et en aval, répartition des ressources entre acteurs), les exigences du travail et la demande opérationnelle (p. ex. intensification du travail causée par l'automatisation), la formation du personnel à prévoir ou sur les autres technologies disponibles. Plusieurs méthodes d'évaluation et de simulation du travail peuvent aussi être réalisées avant cette étape (Voir [368] pour une méthode complète de conception et évaluation "axée sur le travail").

Ces principes de conception fournissent de nouvelles orientations pour adopter une perspective "axée sur le travail" dans des projets initialement technocentriques du monde réel. Ils guident les équipes de conception dans l'articulation des éléments importants qui entourent le projet de transformation (facteurs techniques, humains, opérationnels et organisationnels) pour mener à bien cette transition.

8.5 Apports méthodologiques et pratiques

En termes d'implication pratique, ce travail invite à l'adoption d'une perspective systémique dans des projets de DA qui considère les utilisateurs, mais aussi leurs interrelations avec les autres éléments du système de travail. Par exemple, l'automatisation d'une portion de l'inspection ne doit pas entraver les actions de communications écrites ou oral entre acteurs (opérateurs, ingénieurs manufacturiers, gestionnaires de proximité, planificateurs, laboratoire

d'analyse) qui contribuent au bon déroulement des processus opérationnels de l'entreprise. Ce point de vue résonne avec l'intérêt grandissant des approches systémiques pour l'analyse et la conception de système sociotechnique [466].

Au niveau du projet SARA, le dispositif technologique, avec les capacités actuelles, laisse présager plusieurs scénarios d'utilisation dans le futur système de travail. SARA pourrait être utilisée comme outil de confirmation lorsqu'un défaut présente des caractéristiques physiques difficiles à analyser par les humains. Par exemple, les inspecteurs pourraient (1) scanner les défauts de la pièce sur lesquels ils éprouvent de la difficulté à quantifier leur profondeur ou (2) scanner uniquement les zones de la pièce qui ont des critères d'acceptation très restrictifs. Ce mode opératoire permettrait de désengorger le "laboratoire" qui s'occupe de fournir des analyses dimensionnelles quand les inspecteurs ne sont pas capables d'émettre un diagnostic. Il nous semble que ces scénarios seraient les moins coûteux sur le plan humain (surcharge cognitive) et les plus économiquement viables pour l'entreprise. En ce qui concerne l'interface utilisateur, il nous semble pertinent d'améliorer certains aspects de sa conception en considérant les hypothèses de conception développées (Annexe E) et en s'inspirant des recommandations formulées dans les rapports techniques. De plus, une fois le *lock-out* fini, nous recommandons de procéder à une évaluation sommative de SARA en s'inspirant du protocole d'évaluation "axé sur le travail" [368] présenté aux Annexes F, G et H.

Deuxièmement, cette thèse offre des perspectives pratiques intéressantes en montrant comment combler le fossé qui *sépare une théorie élégante de sa mise en oeuvre concrètes* dans des cas d'études du monde réel [61, p.2]. Nous avons mobilisé le concept de *médiation digitale* [20] en montrant comment concrètement co-développer des objets de conception qui influencent la conception des structures du "monde digital" et vice-versa. Nous avons aussi modifié l'usage de la table d'interdépendance de *Johnson et coll* [61] pour intégrer la sémantique de domaine existant dans le façonnage des situations futures. Ces deux éléments, ainsi que les représentations empiriques (p. ex. *Information Flow Model*), stratégies, méthodes développées pour favoriser la collaboration ergonome-développeurs pourront être réutilisés dans des projets futurs.

Cette thèse a aussi des apports méthodologiques en montrant comment imbriquer les méthodes de l'*ergonomie de conception* avec celles de l'*action design research* (ADR). L'arrimage des deux méthodes réalisé dans cette thèse offre des perspectives intéressantes pour les recherches futures, surtout en considérant les limites associées à la transposition des analyses cognitive [59] ou ergonomique du travail [58] en solutions de conception. En suivant le processus cyclique et les artefacts de conception développés (qui sont des abstractions du dispositif technologique), il est possible de montrer plus explicitement les apports des analyses et la

médiation digitale de l'AET dans le façonnage de la solution digitale. Plus spécifiquement, dans la conceptualisation initiale de la phase de *Diagnostic* proposée par *Mullarkey et Hevner* [22], le chercheur-praticien doit prendre connaissance du domaine d'application dans lequel le projet se déroule, du dispositif technologique ainsi que des bases de connaissances théoriques et pratiques qui vont informer la conception de l'artefact et son intervention dans le projet [22]. Nous soutenons que cette phase peut être complétée par une approche systémique des situations de travail qui vont être touchées par le projet de transformation, idéalement avant le choix initial ou le développement préliminaire des solutions. De cette manière, le diagnostic serait enrichi par des connaissances sur l'activité de travail existant afin d'alimenter un processus de réflexion critique quant aux choix et à l'impact des solutions sur le système de travail. Il est tout à fait concevable que les solutions les plus adaptées au problème ne passent pas nécessairement par des innovations de ruptures, mais suivent des trajectoires incrémentales, et qui ne soient pas forcément technologiques [22, 388].

8.6 Recherche futures

Ce travail doctoral suggère également plusieurs axes de recherches ultérieures. Certaines des pistes de recherche futures découlant des limites de cette étude ont déjà été discutées dans la partie précédente et nous présentons dans cette section les axes de recherches futurs qui proviennent de nos apports théoriques, pratiques et méthodologiques.

8.6.1 Axe 1 : Conception et évaluation de la collaboration HT

Le premier axe de recherche est lié au développement d'une approche intégrée de "conception axée travail humain-technologie" (*teamwork-driven approach*) pour l'I4.0/I5.0. Bien que ces approches gagnent en popularité dans la littérature scientifique [54, 61, 180, 467], il n'existe à notre connaissance aucune approche intégrée qui permettent de relier systématiquement contexte d'usage (présent et futur), travail en équipe HT et développement technologique. Cette thèse propose des résultats empiriques et des outils pratiques qui pourront servir de fondation à la conception d'une approche systématique. Des recherches futures pourraient s'attaquer au développement d'une telle approche pour supporter les équipes de conception à des niveaux macro (phases générales de conception) et micro (tâches et opérations à supporter à l'intérieur des phases de conception). Les principes de conception fournis à la section précédente pourraient donner des orientations de départ pour la construction d'une telle démarche. Nous recommandons aussi aux personnes souhaitant se lancer dans ce pan de recherche de s'inspirer des méthodes de conception [468] et d'évaluation [368] centrées sur le travail, l'approche *Socio-Cognitive Engineering* pour la conception de système cognitif conjoint [469], la

conception centrée sur l'activité (*activity-centered design*) [56], la méthode de *Co-Design* [66] et la littérature sur le "couplage humain-agent" (*human-agent teaming*) [145].

Dans la même lignée, il nous semble pertinent de continuer à produire des données empiriques sur l'intégration de facteurs humains (et organisationnels [211]) dans des projets d'I4.0 et d'I5.0 dans des milieux de travail. Notre recherche s'est déroulée du TRL3 au TRL5 d'un projet d'acquisition technologique, lorsqu'un choix technologique et des développements antérieurs avaient déjà été réalisés. Des futures recherches pourraient (1) explorer comment le recueil et la transformation de données sur le travail humain, et l'intégration d'une perspective collaboration HT peuvent supporter et guider les phases initiales (définition d'un concept d'opération) d'un projet d'ingénierie système [82]; ou (2) renseigner les stratégies, méthodes, outils et objets de conception ayant permis une transition vers des approches plus anthropocentrées. Les méthodes de l'ergonomie prospective pourraient aussi fournir des outils supplémentaires afin de stimuler la créativité nécessaire à la conceptualisation de situations d'usage, et ce, dans des phases très en amont du projet [470].

Enfin dernière direction dans cet axe de recherche, nous encourageons les recherches futures sur la collaboration HT dans des tâches cognitives complexes, telles que la "création de sens" (*sensemaking*) ou la prise de décision. Il serait pertinent de développer conjointement des mesures qui évaluent la performance complémentaire de l'équipe HT dans des tâches décisionnelles [471], incluant la résilience aux erreurs et situations imprévues, en vue d'informer la conception. Ces recherches en milieu naturel ou en milieu contrôlé (laboratoire) seraient pertinentes pour étudier ces mécanismes. Les résultats de ces types de recherche pourraient être généralisés sous la forme de "schémas d'action humain-technologie-organisation" qui formalisent les propriétés invariantes de schémas de décision HT. Il est possible de s'inspirer des méthodes de *van Stijn et coll.* [194] pour codifier ces résultats de manière similaire et créer un répertoire réutilisable de certaines configurations d'équipe HT.

8.6.2 Axe 2 : Renforcer les espaces de médiation

Cette thèse a aussi exploré les espaces de médiation pour concevoir simultanément le monde physique et digital dans des projets de DA. Ce nouveau concept ouvre des avenues de recherche intéressantes pour rassembler des acteurs provenant d'origines disciplinaires différentes et coordonner leurs actions de conception.

En premier lieu, les recherches futures devraient viser la compréhension du travail des concepteurs du monde digital (*AI Scientists, Data & Machine Learning Engineers, Software Developers*) plus en profondeur afin de définir de nouvelles méthodes et moyens pour transcender les barrières disciplinaires entre spécialistes facteurs humains et équipes de développement

dans les espaces de médiation. Cette exploration implique le renouvellement de méthodes d'analyse de l'activité pour des travaux à forte composante intellectuelle (*knowledge worker*), et ce, afin de se saisir des actions prises et de déterminants du cadre de travail qui ne sont pas forcément tangibles par l'analyste (p. ex. relation entre des jeux de données). Parallèlement, il a été mentionné plusieurs fois dans la littérature que les développeurs ont besoin davantage d'orientations et d'outils pour appliquer des principes de conception abstraits à des situations de conception spécifiques [235, 472, 473]. Ce pan de recherches devrait ainsi générer de nouvelles connaissances pour informer la manière dont les développeurs et autres concepteurs peuvent collaborer dans les espaces de médiation. Par exemple, comment les ingénieurs en IA interprètent et opérationnalisent les principes éthiques dans leurs tâches quotidiennes [472].

En deuxième lieu, les recherches futures devraient continuer de développer des approches, méthodes, moyens et outils qui supportent concrètement la collaboration interdisciplinaire dans ces projets de DA, que ce soit dans les phases de conception ou d'évaluations formatives/sommatives. Cette thèse a mis en avant les objets de conception pour intégrer plusieurs perspectives, notamment l'intégration de la sémantique du domaine d'application. Il serait pertinent de continuer dans cette direction en explorant de nouveaux supports de conception qui rendent intelligibles et actionnables les résultats d'analyses de l'existant et favorisent leur articulation dans les contenus de conception. Par exemple, une piste à suivre serait d'étudier comment les spécialistes en facteurs humains peuvent animer et participer à des ateliers de co-conception de *pseudo-codes* qui rassemblent utilisateurs et développeurs. De plus, les recherches futures devraient aussi chercher à convoquer d'autres disciplines pertinentes qui s'intéressent aux aspects éthiques et législatifs des technologies. L'objectif serait d'articuler leurs *intrants* dans les processus de conception pour traiter des questions essentielles telles que les aspects de responsabilité en cas de défaillance ou l'incorporation de biais humains dans les algorithmes.

CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de cette thèse était d'explorer les moyens et possibilités de reconcevoir le travail dans des logiques de collaboration humain-technologie dans les projets de digitalisation et d'automatisation (DA) industrielle. Une approche exploratoire a été adoptée en combinant l'*action design research* à une étude de cas unique. Ce combiné méthodologique a été déployé au travers d'un projet de R&D visant à automatiser la tâche d'inspection industrielle dans le domaine de la maintenance aéronautique.

Les résultats de cette thèse démontrent en premier lieu la complexité du travail d'inspection industrielle en rendant visible, par des représentations empiriques, la dimension socio-cognitive et systémique de cette activité ainsi que le décalage entre le travail prescrit et travail réel. Le processus de prise de décision des inspecteurs repose sur un ensemble de connaissances tacites, de stratégies implicites et de communication inter-opérateurs pour traiter les 37 variables décisionnelles distribuées dans leur système de travail. L'originalité de cette thèse provient aussi de l'étude délibérée des modalités de collaboration entre l'ergonome et les concepteurs pour transformer des données descriptives sur l'activité d'inspection en contenu actionnable de conception. La double immersion simultanée dans les situations de travail et dans le contexte du projet de R&D (besoins et jalons des concepteurs) initie un processus de *médiation digitale* qui met en relation les caractéristiques des "situations de travail / du domaine de travail" avec les propriétés "technologiques". Il résulte de cette première médiation digitale des objets de conception formatifs supportant l'intégration de la sémantique du domaine dans les contenus de conception et montrant pourquoi il est si difficile d'automatiser la tâche d'inspection industrielle.

Dans un deuxième temps, les innovations méthodologiques et conceptuelles de cette thèse contribuent à transcender les barrières disciplinaires pour aborder conjointement les facteurs techniques, humains et organisationnels qui accompagnent les projets de DA en milieu de travail. Les objets de conception ont supporté un travail collaboratif ergonome-concepteurs ayant permis d'anticiper les limitations du dispositif technologiques pour répondre de manière autonome à la demande opérationnelle. Seulement 26% des fonctions de travail sont complètement automatisables compte tenu des capacités technologiques. Ces résultats indiquent comment les méthodes de conception idéalistes ne tenant pas compte des réalités opérationnelles courent le risque d'avoir une valeur pratique limitée et invitent à reconcevoir le travail dans des logiques de travail collaboratif HT pour atteindre l'état souhaité de conception.

Ce travail s'inscrit globalement dans la grande famille des recherches qui soutiennent l'inté-

gration Humain-Système [82], la collaboration humain-technologie [61] et la conception des situations de travail [202] à l'ère du digital. Plus spécifiquement, ce doctorat contribue au développement d'une base théorique, conceptuelle et méthodologique pour orchestrer des espaces de *médiation* "axés sur le travail" dans les projets de DA. La littérature et les concepts qui sont mobilisés étant clairsemés et interdisciplinaires, le modèle conceptuel proposé participe à l'organisation des connaissances entourant ces mécanismes et assure une meilleure structuration pour les recherches et projets futurs. Les recherches futures peuvent appliquer les fondements du modèle conceptuel dans d'autres contextes à la recherche de phénomènes empiriques convergents qui permettrait de valider ou nuancer les résultats reportés dans cette thèse. Faisant émerger le caractère sociotechnique des projets de DA, la thèse contribue ainsi à mettre en perspective l'alignement nécessaire des composantes humaines, organisationnelles, opérationnelles et techniques à réaliser au sein des *espaces de médiation* pour atteindre la situation souhaitée. En termes d'implication pratique, cette recherche permet de conscientiser les développeurs et gestionnaires de projet technologique de concevoir conjointement la technologie et les futures situations de travail. Et cela avec un ancrage opérationnel qui relie les situations de travail actuelles et futures.

La transférabilité des apprentissages de cette étude à d'autres contextes est aussi passée par la formalisation de six principes de conception et la construction d'un cadre de conception (Article 3). Les chercheurs-praticiens en ergonomie, ingénierie système ou informatique pourront adapter les méthodes, outils et objets de conception développés à leur contexte pour favoriser l'intégration des technologies digitales dans les pratiques quotidiennes et leur appropriation par les utilisateurs ciblés.

RÉFÉRENCES

- [1] T. Moulières-Seban, “Conception de systèmes cobotiques industriels. approche cognitive application à la production pyrotechnique au sein d’ariane group,” Thèse de doctorat, ED SPI 209, 2017.
- [2] R. Parasuraman, T. B. Sheridan et C. D. Wickens, “A model for types and levels of human interaction with automation,” IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A : Systems and Humans, vol. 30, n°. 3, p. 286–297, 2000.
- [3] N. McBride et R. R. Hoffman, “Bridging the ethical gap : from human principles to robot instructions,” IEEE Intelligent Systems, vol. 31, n°. 5, p. 76–82, 2016.
- [4] A. B. Markman, “Combining the strengths of naturalistic and laboratory decision-making research to create integrative theories of choice,” Journal of applied research in memory and cognition, vol. 7, n°. 1, p. 1–10, 2018.
- [5] J. Lee et al., “Designing for people,” ShangHai, p. 173, 2017.
- [6] T. Johnson et al., “How and why we need to capture tacit knowledge in manufacturing : Case studies of visual inspection,” Applied Ergonomics, vol. 74, p. 1–9, janv. 2019.
- [7] O. Broberg, V. Andersen et R. Seim, “Participatory ergonomics in design processes : The role of boundary objects,” Applied ergonomics, vol. 42, n°. 3, p. 464–472, 2011.
- [8] J. E. See, “Visual Inspection : A Review of the Literature,” Sandia Report SAND2012-8590, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, p. 77, 2012.
- [9] A. Kujawińska et K. Vogt, “Human Factors in Visual Quality Control,” Management and Production Engineering Review, vol. 6, n°. 2, p. 25–31, juin 2015.
- [10] J. Aust et D. Pons, “Comparative analysis of human operators and advanced technologies in the visual inspection of aero engine blades,” Applied Sciences, vol. 12, n°. 4, p. 2250, 2022.
- [11] M. J. Miller, K. M. McGuire et K. M. Feigh, “Decision support system requirements definition for human extravehicular activity based on cognitive work analysis,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 11, n°. 2, p. 136–165, 2017.
- [12] W. C. Elm et al., “Integrating cognitive systems engineering throughout the systems engineering process,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 2, n°. 3, p. 249–273, 2008.

- [13] M. J. Miller et K. M. Feigh, “Addressing the envisioned world problem : a case study in human spaceflight operations,” Design Science, vol. 5, 2019.
- [14] P. Millot, M.-P. Pacaux-Lemoine et D. Trentesaux, “Une conception anthropo-centrée pour casser le mythe de l' " humain magique" en génie industriel,” dans Congrès International de Génie Industriel, 2015.
- [15] D. Dellermann et al., “The Future of Human-AI Collaboration : A Taxonomy of Design Knowledge for Hybrid Intelligence Systems,” dans Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Maui, Hawaii, USA, 2019, p. 11.
- [16] M. St-Vincent et al., Ergonomic Intervention. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 2014.
- [17] N. Vézina, “La pratique de l’ergonomie face aux tms : ouverture à l’interdisciplinarité,” Comptes rendus du congrès SELF-ACE, p. 44–60, 2001.
- [18] N. Naikar et B. Elix, “Integrated system design : Promoting the capacity of sociotechnical systems for adaptation through extensions of cognitive work analysis,” Frontiers in psychology, p. 962, 2016.
- [19] F. Barcellini, “Développer des interventions capacitanes en conduite du changement. comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail.” Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2015.
- [20] J. C. Recker et al., “From representation to mediation : a new agenda for conceptual modeling research in a digital world,” MIS Quarterly : Management Information Systems, vol. 45, n°. 1, p. 269–300, 2021.
- [21] N. R. Milton, Knowledge Acquisition in Practice : A Step-by-Step Guide. Springer Science & Business Media, mai 2007.
- [22] M. T. Mullarkey et A. R. Hevner, “An elaborated action design research process model,” European Journal of Information Systems, vol. 28, n°. 1, p. 6–20, 2019.
- [23] S. L. Pan et al., “Sustainability Design Principles for a Wildlife Management Analytics System : An Action Design Research,” European Journal of Information Systems, vol. 30, n°. 4, p. 452–473, juill. 2021.
- [24] K. Song et Y. Yan, “A noise robust method based on completed local binary patterns for hot-rolled steel strip surface defects,” Applied Surface Science, vol. 285, p. 858–864, 2013.
- [25] Y. He et al., “An end-to-end steel surface defect detection approach via fusing multiple hierarchical features,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, n°. 4, p. 1493–1504, 2019.

- [26] H. Dong et al., “Pga-net : Pyramid feature fusion and global context attention network for automated surface defect detection,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, n°. 12, p. 7448–7458, 2019.
- [27] M. Hertzum, “Organizational implementation : the design in use of information systems,” Synthesis Lectures on Human-Centered Informatics, vol. 14, n°. 2, p. i–109, 2021.
- [28] G. Cabour, É. Ledoux et S. Bassetto, “Aligning work analysis and modeling with the engineering goals of a cyber-physical-social system for industrial inspection,” Applied Ergonomics, vol. 102, p. 103703, 2022.
- [29] L. D. Xu, E. L. Xu et L. Li, “Industry 4.0 : state of the art and future trends,” International Journal of Production Research, vol. 56, n°. 8, p. 2941–2962, 2018.
- [30] C. Danjou, L. Rivest et R. Pellerin, “Industrie 4.0 : des pistes pour aborder l’ère du numérique et de la connectivité,” Centre facilitant la recherche et l’innovation dans les organisations (CEFRIO) : Montréal, QC, Canada, 2017.
- [31] B. A. Kadir, O. Broberg et C. S. da Conceicao, “Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in industry 4.0,” Computers & Industrial Engineering, vol. 137, p. 106004, 2019.
- [32] W. P. Neumann et al., “Industry 4.0 and the human factor—a systems framework and analysis methodology for successful development,” International Journal of Production Economics, vol. 233, p. 107992, 2021.
- [33] M. Passalacqua et al., “Human-centred ai in the age of industry 5.0 : A systematic review protocol,” dans 24th International Conference on Human-Computer Interaction. Springer, 2022.
- [34] G. Declerck, X. Aimé et al., “Reasons (not) to spend a few billions more on ehers : how human factors research can help,” Yearbook of medical informatics, vol. 23, n°. 01, p. 90–96, 2014.
- [35] B. G. Arndt et al., “Tethered to the ehr : primary care physician workload assessment using ehr event log data and time-motion observations,” The Annals of Family Medicine, vol. 15, n°. 5, p. 419–426, 2017.
- [36] D. Sull et C. Reavis, “Tesla’s entry into the us auto industry,” 2019.
- [37] S. Lebovitz, N. Levina et H. Lifshitz-Assaf, “Is ai ground truth really “true”? the dangers of training and evaluating ai tools based on experts’ know-what,” Management Information Systems Quarterly, vol. 45, n°. 3, p. 1501–1525, 2021.

- [38] J. D. Lee et B. D. Seppelt, “Human Factors and Ergonomics in Automation Design,” dans Handbook of Human Factors and Ergonomics. John Wiley & Sons, Ltd, 2012, p. 1615–1642.
- [39] P. K. R. Maddikunta et al., “Industry 5.0 : A survey on enabling technologies and potential applications,” Journal of Industrial Information Integration, vol. 26, p. 100257, 2021.
- [40] S. Nahavandi, “Industry 5.0—a human-centric solution,” Sustainability, vol. 11, n°. 16, p. 4371, 2019.
- [41] A. Akundi et al., “State of industry 5.0—analysis and identification of current research trends,” Applied System Innovation, vol. 5, n°. 1, p. 27, 2022.
- [42] P. M. Bednar et C. Welch, “Socio-technical perspectives on smart working : Creating meaningful and sustainable systems,” Information Systems Frontiers, vol. 22, n°. 2, p. 281–298, 2020.
- [43] M. Ciccarelli et al., “Human work sustainability tool,” Journal of Manufacturing Systems, vol. 62, p. 76–86, 2022.
- [44] D. Petrat, “Artificial intelligence in human factors and ergonomics : an overview of the current state of research,” Discover Artificial Intelligence, vol. 1, n°. 1, p. 1–10, 2021.
- [45] M. Breque, L. De Nul et A. Petridis, “Industry 5.0 : towards a sustainable, human-centric and resilient european industry,” Luxembourg, LU : European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, 2021.
- [46] C. Abrassart et al., “Montréal declaration for a responsible development of artificial intelligence,” 2018.
- [47] J. R. Jiao et al., “Towards augmenting cyber-physical-human collaborative cognition for human-automation interaction in complex manufacturing and operational environments,” International Journal of Production Research, vol. 58, n°. 0, p. 5089–5111, mars 2020.
- [48] I. Seeber et al., “Machines as teammates : A research agenda on ai in team collaboration,” Information & management, vol. 57, n°. 2, p. 103174, 2020.
- [49] D. Sparrow, K. Kruger et A. Basson, “An architecture to facilitate the integration of human workers in industry 4.0 environments,” International Journal of Production Research, vol. 0, n°. 0, p. 1–19, 2021.
- [50] A. Dubey et al., “Haco : A framework for developing human-ai teaming,” dans Proceedings of the 13th Innovations in Software Engineering Conference on Formerly known as India Software Engineering Conference, 2020, p. 1–9.

- [51] S. T. Mueller et al., “Principles of Explanation in Human-AI Systems,” arXiv :2102.04972 [cs], févr. 2021.
- [52] Q. V. Liao et al., “Connecting algorithmic research and usage contexts : A perspective of contextualized evaluation for explainable ai,” 2022. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2206.10847>
- [53] Q. V. Liao, D. Gruen et S. Miller, “Questioning the ai : informing design practices for explainable ai user experiences,” dans Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2020, p. 1–15.
- [54] M. M. Peeters et al., “Hybrid collective intelligence in a human–ai society,” AI & SOCIETY, vol. 36, n°. 1, p. 217–238, 2021.
- [55] M. Nguyen et C. Mougenot, “A systematic review of empirical studies on multidisciplinary design collaboration : Findings, methods, and challenges,” Design Studies, vol. 81, p. 101120, 2022.
- [56] F. Barcellini et al., “Collaborative robotics and industry 4.0 : an engineering, sociology and activity-centered ergonomics cross-experience,” dans Congress of the International Ergonomics Association. Springer, 2021, p. 597–604.
- [57] J. R. Wilson et S. Sharples, Evaluation of Human Work. CRC Press, 2015.
- [58] F. Guérin et al., Concevoir le travail, le défi de l’ergonomie, ser. Collection Travail & activité humaine. Octarès Editions, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://books.google.ca/books?id=XUJmzgEACAAJ>
- [59] K. J. Vicente, Cognitive work analysis : Toward safe, productive, and healthy computer-based work. CRC Press, 1999.
- [60] C. Emmenegger et D. Norman, “The challenges of automation in the automobile,” Ergonomics, vol. 62, n°. 4, p. 512–513, avr. 2019.
- [61] M. Johnson et J. M. Bradshaw, “The role of interdependence in trust,” dans Trust in Human-Robot Interaction. Elsevier, 2021, p. 379–403.
- [62] E. Roth et al., “Beyond levels of automation : Developing more detailed guidance for human automation interaction design,” dans Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2018, p. 150–154.
- [63] M. Johnson, J. M. Bradshaw et P. J. Feltovich, “Tomorrow’s human–machine design tools : From levels of automation to interdependencies,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 12, n°. 1, p. 77–82, 2018.

- [64] G. A. Jamieson et G. Skraaning Jr, “Levels of automation in human factors models for automation design : Why we might consider throwing the baby out with the bathwater,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 12, n^o. 1, p. 42–49, 2018.
- [65] S. Oppl et C. Stary, Designing Digital Work : Concepts and Methods for Human-centered Digitization. Springer Nature, 2019.
- [66] M. Johnson et al., “Coactive Design : Designing Support for Interdependence in Joint Activity,” Journal of Human-Robot Interaction, vol. 3, n^o. 1, p. 43–69, févr. 2014.
- [67] M. Johnson, J. M. Bradshaw et P. J. Feltovich, “Tomorrow’s Human–Machine Design Tools : From Levels of Automation to Interdependencies ;,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, oct. 2017.
- [68] M. Zouinar, “Évolutions de l’Intelligence Artificielle : quels enjeux pour l’activité humaine et la relation Humain-Machine au travail ?” Activités, n^o. 17-1, avr. 2020.
- [69] F. Cabitza et J.-D. Zeitoun, “The proof of the pudding : In praise of a culture of real-world validation for medical artificial intelligence,” Annals of Translational Medicine, vol. 7, n^o. 8, p. 9, 2019.
- [70] S. Dhanorkar et al., “Who needs to know what, when ? : Broadening the explainable ai (xai) design space by looking at explanations across the ai lifecycle,” dans Designing Interactive Systems Conference 2021, 2021, p. 1591–1602.
- [71] M. Tomalin et al., “The practical ethics of bias reduction in machine translation : why domain adaptation is better than data debiasing,” Ethics and Information Technology, vol. 23, n^o. 3, p. 419–433, 2021.
- [72] A. Luccioni et Y. Bengio, “On the morality of artificial intelligence,” arXiv preprint arXiv :1912.11945, 2019.
- [73] L. de Vries et L.-O. Bligård, “Visualising safety : The potential for using sociotechnical systems models in prospective safety assessment and design,” Safety Science, vol. 111, p. 80–93, 2019.
- [74] R. K. Yin, Case study research : Design and methods. sage, 2014, vol. 5.
- [75] T. Zheng et al., “The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context : a systematic literature review,” International Journal of Production Research, vol. 59, n^o. 6, p. 1922–1954, 2021.
- [76] M. Rupp et al., “Industry 4.0 : A technological-oriented definition based on bibliometric analysis and literature review,” Journal of Open Innovation : Technology, Market, and Complexity, vol. 7, n^o. 1, p. 68, 2021.

- [77] E. Rauch, C. Linder et P. Dallasega, “Anthropocentric perspective of production before and within industry 4.0,” Computers & Industrial Engineering, vol. 139, p. 105644, 2020.
- [78] W. Xiong et al., “Challenges of human—machine collaboration in risky decision-making,” Frontiers of Engineering Management, p. 1–15, 2022.
- [79] I. F. of Robotics, “Executive summary world robotics 2021 service robots,” 2021.
- [80] P. Thomas et D. Nicholas, “The fourth industrial revolution : Shaping new era,” Journal of International Affairs, vol. 72, n°. 1, p. 17–22, 2018.
- [81] A. Schumacher, S. Erol et W. Sihn, “A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises,” Procedia Cirp, vol. 52, p. 161–166, 2016.
- [82] G. A. Boy, Human–Systems Integration : From Virtual to Tangible. CRC Press, janv. 2020.
- [83] A. G. Frank, L. S. Dalenogare et N. F. Ayala, “Industry 4.0 technologies : Implementation patterns in manufacturing companies,” International Journal of Production Economics, vol. 210, p. 15–26, 2019.
- [84] P. Leitão et al., “Quo vadis industry 4.0 ? position, trends, and challenges,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 1, p. 298–310, 2020.
- [85] A. Moeuf et al., “The industrial management of smes in the era of industry 4.0,” International journal of production research, vol. 56, n°. 3, p. 1118–1136, 2018.
- [86] E. Stumpf, “The industry 4.0-concept within aerospace,” Handbook Industry 4.0, p. 643–658, 2022.
- [87] A. V. Carvalho et al., “Quality 4.0 : an overview,” Procedia Computer Science, vol. 181, p. 341–346, 2021.
- [88] A. Zonnenshain et R. S. Kenett, “Quality 4.0—the challenging future of quality engineering,” Quality Engineering, vol. 32, n°. 4, p. 614–626, 2020.
- [89] J. Aust et al., “Automated defect detection and decision-support in gas turbine blade inspection,” Aerospace, vol. 8, n°. 2, p. 30, 2021.
- [90] A. Ceruti et al., “Maintenance in aeronautics in an industry 4.0 context : The role of augmented reality and additive manufacturing,” Journal of Computational Design and Engineering, vol. 6, n°. 4, p. 516–526, 2019.
- [91] A. Chouchene et al., “Augmented reality-based framework supporting visual inspection for automotive industry,” Applied System Innovation, vol. 5, n°. 3, p. 48, 2022.

- [92] M. Gallab et al., “Aeronautics 4.0 : Modeling and simulation of a smart tool,” dans 2022 The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, 2022, p. 200–206.
- [93] A. Doğru et al., “Using convolutional neural networks to automate aircraft maintenance visual inspection,” Aerospace, vol. 7, n°. 12, p. 171, 2020.
- [94] T. Malekzadeh et al., “Aircraft fuselage defect detection using deep neural networks,” arXiv preprint arXiv :1712.09213, 2017.
- [95] P. Shailaja et S. Padmanabhan, “A survey on autonomous damage detection on aircraft surfaces using deep learning models,” dans 2022 6th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC). IEEE, 2022, p. 1135–1140.
- [96] J. Arents et M. Greitans, “Smart industrial robot control trends, challenges and opportunities within manufacturing,” Applied Sciences, vol. 12, n°. 2, p. 937, 2022.
- [97] V. Alonso et al., “Industry 4.0 implications in machine vision metrology : an overview,” Procedia manufacturing, vol. 41, p. 359–366, 2019.
- [98] J. Zhang, G. Cosma et J. Watkins, “Image enhanced mask r-cnn : A deep learning pipeline with new evaluation measures for wind turbine blade defect detection and classification,” Journal of Imaging, vol. 7, n°. 3, p. 46, 2021.
- [99] C. Lévesque et al., “Industrie 4.0, l’avenir du travail et des compétences.” Centre de recherche interuniversitaire sur la mondialisation et le travail, Montréal, QC, Canada, Rapport technique, 2021.
- [100] T. Hess et al., “Options for formulating a digital transformation strategy.” MIS Quarterly Executive, vol. 15, n°. 2, 2016.
- [101] S. S. Kamble, A. Gunasekaran et S. A. Gawankar, “Sustainable industry 4.0 framework : A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives,” Process safety and environmental protection, vol. 117, p. 408–425, 2018.
- [102] A. Issa et al., “Industrie 4.0 roadmap : Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment,” Procedia Cirp, vol. 72, p. 973–978, 2018.
- [103] L. Stefan et al., “Concept for an evolutionary maturity based industrie 4.0 migration model,” Procedia Cirp, vol. 72, p. 404–409, 2018.
- [104] B. Bigliardi, E. Bottani et G. Casella, “Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0 : a bibliographic analysis,” Procedia manufacturing, vol. 42, p. 322–326, 2020.

- [105] G. Culot et al., “Behind the definition of industry 4.0 : Analysis and open questions,” International Journal of Production Economics, vol. 226, p. 107617, 2020.
- [106] F. Zaoui et N. Souissi, “Roadmap for digital transformation : A literature review,” Procedia Computer Science, vol. 175, p. 621–628, 2020.
- [107] M. Sony et S. Naik, “Industry 4.0 integration with socio-technical systems theory : A systematic review and proposed theoretical model,” Technology in society, vol. 61, p. 101248, 2020.
- [108] —, “Critical factors for the successful implementation of industry 4.0 : a review and future research direction,” Production Planning & Control, vol. 31, n°. 10, p. 799–815, 2020.
- [109] S. Agnissarman et al., “A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection,” Automation in Construction, vol. 97, p. 52–76, 2019.
- [110] L. Silvestri et al., “Maintenance transformation through industry 4.0 technologies : A systematic literature review,” Computers in industry, vol. 123, p. 103335, 2020.
- [111] G. Beier et al., “Industry 4.0 : How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—a literature review,” Journal of cleaner production, vol. 259, p. 120856, 2020.
- [112] X. Sun et al., “A review of methodologies for integrating human factors and ergonomics in engineering design,” International Journal of Production Research, vol. 57, n°. 15-16, p. 4961–4976, 2019.
- [113] J. van Diggelen et al., “Developing Effective and Resilient Human-Agent Teamwork Using Team Design Patterns,” IEEE Intelligent Systems, vol. 34, n°. 2, p. 15–24, mars 2019.
- [114] R. Sharpe et al., “An industrial evaluation of an industry 4.0 reference architecture demonstrating the need for the inclusion of security and human components,” Computers in industry, vol. 108, p. 37–44, 2019.
- [115] P. Fantini et al., “Symbiotic integration of human activities in cyber-physical systems,” IFAC-PapersOnLine, vol. 52, n°. 19, p. 133–138, 2019.
- [116] F. Grandi et al., “Trends in human factors integration for the design of industry 4.0,” dans International Conference on Design, Simulation, Manufacturing : The Innovation Exchange. Springer, 2021, p. 785–792.
- [117] M.-E. B. Chaumon, Les transformations digitales à l’épreuve de l’activité et du travail : Comprendre et accompagner les mutations technologiques émergentes. ISTE Group, oct. 2021.

- [118] B. A. Kadir et O. Broberg, “Human-centered design of work systems in the transition to industry 4.0,” Applied Ergonomics, vol. 92, p. 103334, 2021.
- [119] E. G. Carayannis et al., “Smart environments and techno-centric and human-centric innovations for industry and society 5.0 : A quintuple helix innovation system view towards smart, sustainable, and inclusive solutions,” Journal of the Knowledge Economy, vol. 13, n^o. 2, p. 926–955, 2022.
- [120] E. Loup-Escande, “Concevoir des technologies émergentes acceptables : complémentarité des approches expérimentale, écologique et prospective,” Amiens, France : Université de Picardie Jules Verne, 2019.
- [121] R. Spies, S. Grobbelaar et A. Botha, “A scoping review of the application of the task-technology fit theory,” dans Conference on e-Business, e-Services and e-Society. Springer, 2020, p. 397–408.
- [122] M. Jalayer et al., “Automatic visual inspection of rare defects : A framework based on gp-wgan and enhanced faster r-cnn,” dans 2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT). IEEE, 2021, p. 221–227.
- [123] V. Priya et al., “Robust attack detection approach for iiot using ensemble classifier,” arXiv preprint arXiv :2102.01515, 2021.
- [124] L. Nazareno et D. S. Schiff, “The impact of automation and artificial intelligence on worker well-being,” Technology in Society, vol. 67, p. 101679, 2021.
- [125] “Iso 9241-210 :2019,” Jul 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.iso.org/standard/52075.html>
- [126] A. Rapp, “In search for design elements : a new perspective for employing ethnography in human-computer interaction design research,” International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 37, n^o. 8, p. 783–802, 2021.
- [127] J. Iivari et N. Iivari, “Varieties of user-centeredness,” dans Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS’06), vol. 8. IEEE, 2006, p. 176a–176a.
- [128] P. Fantini, M. Pinzone et M. Taisch, “Placing the operator at the centre of industry 4.0 design : Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems,” Computers & Industrial Engineering, vol. 139, p. 105058, 2020.
- [129] M.-P. Pacaux-Lemoine et al., “Introduction to the special section humans and industry 4.0,” Cognition, Technology & Work, vol. 24, n^o. 1, p. 1–5, 2022.
- [130] A. Richter et al., “Digital work design,” Business & Information Systems Engineering, vol. 60, n^o. 3, p. 259–264, 2018.

- [131] S. Waschull et al., “The redesign of blue-and white-collar work triggered by digitalization : collar matters,” Computers & Industrial Engineering, vol. 165, p. 107910, 2022.
- [132] C. Lafeuillade, A et al., “Intégrer de la robotique collaborative dans les situations du travail : les intentions des dirigeants de pme dans les transformations digitales,” dans Les transformations digitales à l’épreuve de l’activité et du travail : Comprendre et accompagner les mutations technologiques émergentes. ISTE Group, oct. 2021.
- [133] E. M. Roth et al., “Function Allocation Considerations in the Era of Human Autonomy Teaming,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 13, n°. 4, p. 199–220, déc. 2019.
- [134] F. Barcellini, L. Van Belleghem et F. Daniellou, “Design projects as opportunities for the development of activities,” dans Constructive Ergonomics. CRC Press, 2015, p. 150–163.
- [135] L. V. Belleghem, “La simulation de l’activité en conception ergonomique : acquis et perspectives,” Activités, vol. 15, n°. 15-1, 2018.
- [136] L. Van Belleghem, “Simulating digital activity in the making : Elements of methodology,” Digital Transformations in the Challenge of Activity and Work : Understanding and Supporting Technological Changes, vol. 3, p. 211–223, 2021.
- [137] V. Roblek, M. Meško et A. Krapež, “A complex view of industry 4.0,” Sage open, vol. 6, n°. 2, p. 2158244016653987, 2016.
- [138] B. Shneiderman, “Human-centered artificial intelligence : Reliable, safe & trustworthy,” International Journal of Human–Computer Interaction, vol. 36, n°. 6, p. 495–504, 2020.
- [139] S. Pasandideh, P. Pereira et L. Gomes, “Cyber-physical-social systems : Taxonomy, challenges, and opportunities,” IEEE Access, vol. 10, p. 42 404–42 419, 2022.
- [140] M.-P. Pacaux-Lemoine et F. Flemisch, “Human-cyber-physical system integration (hsi) in industry 4.0 : design and evaluation methods,” dans 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). IEEE, 2021, p. 1–6.
- [141] A. Adriaensen et al., “Teaming with industrial cobots : A socio-technical perspective on safety analysis,” Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, vol. 32, n°. 2, p. 173–198, 2022.
- [142] M.-P. Pacaux-Lemoine et al., “Designing intelligent manufacturing systems through human-machine cooperation principles : A human-centered approach,” Computers & Industrial Engineering, vol. 111, p. 581–595, 2017.
- [143] F. Sgarbossa et al., “Human factors in production and logistics systems of the future,” Annual Reviews in Control, vol. 49, p. 295–305, 2020.

- [144] R. J. B. Hutton, “190Macroognitive Models of Expertise,” dans The Oxford Handbook of Expertise. Oxford University Press, 11 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198795872.013.9>
- [145] E. National Academies of Sciences et Medicine, Human-AI Teaming : State-of-the-Art and Research Needs. Washington, DC : The National Academies Press, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26355/human-ai-teaming-state-of-the-art-and-research-needs>
- [146] W. Xu et al., “Transitioning to human interaction with ai systems : New challenges and opportunities for hci professionals to enable human-centered ai,” International Journal of Human-Computer Interaction, p. 1–25, 2022.
- [147] H. Y. Fouad et al., “Finding the path toward design of synergistic human-centric complex systems,” dans Engineering Artificially Intelligent Systems. Springer, 2021, p. 73–89.
- [148] N.-n. Zheng et al., “Hybrid-augmented intelligence : Collaboration and cognition,” Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, vol. 18, n°. 2, p. 153–179, févr. 2017.
- [149] A. De Regt et E. Gagnon, “Rethinking how humans and machines make sense together,” dans Proc. 26th Amer. Conf. Inf. Syst, 2020.
- [150] J.-C. Le Coze, Trente Ans d’accidents - Le Nouveau Visage Des Risques Sociotechnologiques. Octares, 2016.
- [151] S. W. Dekker et D. D. Woods, “Maba-maba or abracadabra ? progress on human-automation co-ordination,” Cognition, Technology & Work, vol. 4, n°. 4, p. 240–244, 2002.
- [152] G. Boy, Tangible Interactive Systems : Grasping the Real World with Computers, ser. Human-Computer Interaction Series. Springer International Publishing, 2016.
- [153] R. Challenger, C. W. Clegg et C. Shepherd, “Function allocation in complex systems : reframing an old problem,” Ergonomics, vol. 56, n°. 7, p. 1051–1069, 2013.
- [154] J. C. De Winter et D. Dodou, “Why the fitts list has persisted throughout the history of function allocation,” Cognition, Technology & Work, vol. 16, n°. 1, p. 1–11, 2014.
- [155] A. R. Pritchett, S. Y. Kim et K. M. Feigh, “Measuring human-automation function allocation,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 8, n°. 1, p. 52–77, 2014.
- [156] B. D. Sawyer et al., “Human factors and ergonomics in design of a3 : Automation, autonomy, and artificial intelligence,” Handbook of Human Factors and Ergonomics, p. 1385–1416, 2021.

- [157] Y. M. Goh et al., “A variability taxonomy to support automation decision-making for manufacturing processes,” Production Planning & Control, vol. 31, n°. 5, p. 383–399, 2020.
- [158] T. B. Sheridan, Telerobotics, automation, and human supervisory control. MIT press, 1992.
- [159] M. R. Endsley, “From here to autonomy : lessons learned from human–automation research,” Human factors, vol. 59, n°. 1, p. 5–27, 2017.
- [160] C. Guerin et al., “Toward production operator 4.0 : modelling human-machine cooperation in industry 4.0 with cognitive work analysis,” IFAC-PapersOnLine, vol. 52, n°. 19, p. 73–78, 2019.
- [161] C. Wickens, “Automation stages & levels, 20 years after,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 12, n°. 1, p. 35–41, 2018.
- [162] D. B. Kaber, “Issues in human–automation interaction modeling : Presumptive aspects of frameworks of types and levels of automation,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 12, n°. 1, p. 7–24, 2018.
- [163] M. IJtsma et al., “Computational methodology for the allocation of work and interaction in human-robot teams,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 13, n°. 4, p. 221–241, 2019.
- [164] K. M. Feigh et al., “Shifting role for human factors in an ‘unmanned’ era,” Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 19, n°. 4, p. 389–405, juill. 2018.
- [165] G. Baxter et al., “Socio-technical systems : From design methods to systems engineering,” Interacting with Computers, vol. 23, n°. 1, p. 4–17, janv. 2011.
- [166] P. Rauffet et al., “Designing sociotechnical systems : a cwa-based method for dynamic function allocation,” dans Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2015, 2015, p. 1–8.
- [167] P. R. Daugherty et al., Human+ machine : Reimagining work in the age of AI. Harvard Business Press, 2018.
- [168] K. M. Feigh et al., “Requirements for effective function allocation : A critical review,” Journal of cognitive engineering and decision making, vol. 8, n°. 1, p. 23–32, 2014.
- [169] L. M. Ma et al., “Metrics for human-robot team design : A teamwork perspective on evaluation of human-robot teams,” ACM Transactions on Human-Robot Interaction, 2022.

- [170] E. Hollnagel et D. D. Woods, Joint cognitive systems : Foundations of cognitive systems engineering. CRC press, 2005.
- [171] J. M. Bradshaw, “From knowledge science to symbiosis science,” International journal of human-computer studies, vol. 71, n°. 2, p. 171–176, 2013.
- [172] L. Wang et al., “Symbiotic human-robot collaborative assembly,” CIRP Annals, juin 2019.
- [173] J.-M. Hoc, “Vers une coopération homme-machine en situation dynamique,” Ergonomie, p. 269–284, 2004.
- [174] E. Hollnagel, “From function allocation to function congruence,” dans Coping with computers in the cockpit. Routledge, 2018, p. 29–54.
- [175] N. McMeekin et al., “How methodological frameworks are being developed : evidence from a scoping review,” BMC medical research methodology, vol. 20, n°. 1, p. 1–9, 2020.
- [176] J. C. Mateus et al., “A structured methodology for the design of a human-robot collaborative assembly workplace,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, févr. 2019.
- [177] J. M. Bradshaw, P. J. Feltovich et M. Johnson, “Human-agent interaction,” dans The handbook of human-machine interaction. CRC Press, 2017, p. 283–300.
- [178] R. W. Andrews et al., “The role of shared mental models in human-ai teams : a theoretical review,” Theoretical Issues in Ergonomics Science, p. 1–47, 2022.
- [179] C. Navarro, “Une analyse cognitive de l’interaction dans les activités de travail,” Le travail humain, vol. 54, n°. 2, 2010.
- [180] M. Johnson et A. Vera, “No ai is an island : the case for teaming intelligence,” AI magazine, vol. 40, n°. 1, p. 16–28, 2019.
- [181] S. Bankins, “The ethical use of artificial intelligence in human resource management : a decision-making framework,” Ethics and Information Technology, vol. 23, n°. 4, p. 841–854, 2021.
- [182] E. Matheson et al., “Human-robot collaboration in manufacturing applications : A review,” Robotics, vol. 8, n°. 4, p. 100, 2019.
- [183] M. Tsvetkova et al., “Understanding human-machine networks : a cross-disciplinary survey,” ACM Computing Surveys (CSUR), vol. 50, n°. 1, p. 1–35, 2017.
- [184] J.-M. Salotti et al., “Classification des Systèmes Cobotiques,” Ingénierie cognitive, vol. 1, n°. 1, janv. 2018.

- [185] M. A. Goodrich, A. C. Schultz et al., “Human–robot interaction : a survey,” Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction, vol. 1, n°. 3, p. 203–275, 2008.
- [186] H. A. Yanco et J. Drury, “Classifying human-robot interaction : an updated taxonomy,” dans 2004 IEEE international conference on systems, man and cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583), vol. 3. IEEE, 2004, p. 2841–2846.
- [187] L. Onnasch et E. Roesler, “A taxonomy to structure and analyze human–robot interaction,” International Journal of Social Robotics, vol. 13, n°. 4, p. 833–849, 2021.
- [188] N. M. Gomes et al., “Reinforcement learning for collaborative robots pick-and-place applications : A case study,” Automation, vol. 3, n°. 1, p. 223–241, 2022.
- [189] D. Romero et al., “The operator 4.0 : Human cyber-physical systems & adaptive automation towards human-automation symbiosis work systems,” dans IFIP international conference on advances in production management systems. Springer, 2016, p. 677–686.
- [190] S. Bruni et al., “Introducing a human-automation collaboration taxonomy (hact) in command and control decision-support systems,” dans 12th International Command and Control Research and Technology Symposium. Command & Control Research Program Newport, MA, 2007, p. 1–13.
- [191] R. Jain, N. Garg et S. N. Khera, “Effective human–ai work design for collaborative decision-making,” Kybernetes, n°. ahead-of-print, 2022.
- [192] J. van Diggelen et M. Johnson, “Team design patterns,” dans Proceedings of the 7th International Conference on Human-Agent Interaction, 2019, p. 118–126.
- [193] J. Van Diggelen et al., “Developing effective and resilient human-agent teamwork using team design patterns,” IEEE intelligent systems, vol. 34, n°. 2, p. 15–24, 2018.
- [194] J. J. van Stijn et al., “Team design patterns for moral decisions in hybrid intelligent systems : A case study of bias mitigation,” dans 2021 AAAI Spring Symposium on Combining Machine Learning and Knowledge Engineering, AAAI-MAKE 2021. CEUR-WS, 2021, p. 1–12.
- [195] S. K. Parker et G. Grote, “Automation, algorithms, and beyond : Why work design matters more than ever in a digital world,” Applied Psychology, 2020.
- [196] P. Puranam, “Human–ai collaborative decision-making as an organization design problem,” Journal of Organization Design, vol. 10, n°. 2, p. 75–80, 2021.
- [197] A. Umbrico, A. Orlandini et A. Cesta, “An ontology for human-robot collaboration,” Procedia CIRP, vol. 93, p. 1097–1102, 2020.

- [198] D. Dellermann et al., “Hybrid Intelligence,” Business & Information Systems Engineering, mars 2019.
- [199] A. Adriaensen et al., “Interdependence analysis in collaborative robot applications from a joint cognitive functional perspective,” International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 90, p. 103320, 2022.
- [200] P. J. Ågerfalk et F. Karlsson, “Artefactual and empirical contributions in information systems research,” 2020.
- [201] J. Morley et al., “From what to how : an initial review of publicly available ai ethics tools, methods and research to translate principles into practices,” dans Ethics, Governance, and Policies in Artificial Intelligence. Springer, 2021, p. 153–183.
- [202] A. Garrigou et al., “Contributions et démarche de l’ergonomie dans les processus de conception,” Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, n°. 3-2, 2001.
- [203] A. R. Pritchett, S. Y. Kim et K. M. Feigh, “Modeling human–automation function allocation,” Journal of cognitive engineering and decision making, vol. 8, n°. 1, p. 33–51, 2014.
- [204] J. R. Wilson, “Fundamentals of systems ergonomics/human factors,” Applied Ergonomics, vol. 45, n°. 1, p. 5–13, 2014.
- [205] D. Tran Luciani, J. Löwgren et J. Lundberg, “Designing fine-grained interactions for automation in air traffic control,” Cognition, Technology & Work, vol. 22, n°. 4, p. 685–701, 2020.
- [206] F. Darses et M. de Montmollin, “I. le travail et l’ergonomie,” Reperes, vol. 5, p. 7–18, 2012.
- [207] G. Salvendy et W. Karwowski, Handbook of human factors and ergonomics. John Wiley & Sons, 2021.
- [208] L. Cuvelier et D. D. Woods, “Sécurité réglée et/ou sécurité gérée : quand l’ingénierie de la résilience réinterroge l’ergonomie de l’activité,” Le travail humain, vol. 82, n°. 1, p. 41–66, 2019.
- [209] F. Daniellou, “L’ergonomie en quête de ses principes débats épistémologiques (2e éd. augmentée),” Éditions Octarès, 2015.
- [210] F. Guérin, A. Laville et F. Daniellou, Comprendre le travail pour le transformer : la pratique de l’ergonomie. Editions de l’ANACT, 1997.
- [211] F. Daniellou, I. Boissières et M. Simard, Les facteurs humains et organisationnels de la sécurité industrielle : un état de l’art. FonCSI, 2010.

- [212] J. Leplat, “1. la modélisation en ergonomie à travers son histoire,” dans Formalismes de modélisation pour l’analyse du travail et l’ergonomie. Presses Universitaires de France, 2003, p. 1–26.
- [213] J. Petit, “Intervention sur l’organisation : concevoir des dispositifs de régulation pour un travail plus démocratique,” Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2020.
- [214] R. González et A. Weill-Fassina, “Modalités de régulation du processus de travail dans les activités de service en crèche,” Activités, vol. 2, n°. 2-2, 2005.
- [215] S. Aries, B. Le Blanc et J.-L. Ermine, “Mask : une méthode d’ingénierie des connaissances pour l’analyse et la structuration des connaissances,” 2008.
- [216] M. Willis et al., “Qualitative and quantitative approach to assess the potential for automating administrative tasks in general practice,” BMJ open, vol. 10, n°. 6, p. e032412, 2020.
- [217] G. Klein et C. Wright, “Macro cognition : from theory to toolbox,” Frontiers in psychology, vol. 7, p. 54, 2016.
- [218] G. Klein et al., “Macro cognition,” IEEE intelligent systems, vol. 18, n°. 3, p. 81–85, 2003.
- [219] R. R. Hoffman et M. D. McNeese, “A history for macro cognition,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 3, n°. 2, p. 97–110, 2009.
- [220] R. R. Hoffman et al., “Metrics for explainable AI : Challenges and prospects,” arXiv preprint arXiv :1812.04608, 2018.
- [221] C. Baber, “Is expertise all in the mind ? How embodied, embedded, enacted, extended, situated, and distributed theories of cognition account for expert performance,” dans The Oxford Handbook of Expertise. Oxford University Press, 11 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198795872.013.9>
- [222] J. Lee et al., Designing for People : An introduction to human factors engineering, 08 2017.
- [223] E. S. Patterson et R. R. Hoffman, “Visualization framework of macro cognition functions,” Cognition, Technology & Work, vol. 14, n°. 3, p. 221–227, 2012.
- [224] L. Suchman et L. A. Suchman, Human-machine reconfigurations : Plans and situated actions. Cambridge university press, 2007.
- [225] S. Elsayah et al., “A methodology for eliciting, representing, and analysing stakeholder knowledge for decision making on complex socio-ecological systems : From cognitive maps to agent-based models,” Journal of Environmental Management, vol. 151, p. 500–516, mars 2015.

- [226] M. H. Hobballah et al., “Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge : Application to wood-based insulating materials,” Expert Systems with Applications, vol. 92, p. 95–105, févr. 2018.
- [227] R. Hoffman, “Accomplishments of naturalistic decision making research and applications to emerging defense challenges,” Florida inst for human and machine cognition inc Pensacola FL, Rapport technique, 2015.
- [228] N. R. Shadbolt et al., “Knowledge elicitation,” Evaluation of human work, p. 163–200, 2015.
- [229] A. R. Pritchett, “Work, and the expertise of workers,” dans Cognitive Systems Engineering. CRC Press, 2017, p. 229–246.
- [230] T. Morineau et J. M. Flach, “The heuristic version of cognitive work analysis : A first application to medical emergency situations,” Applied ergonomics, vol. 79, p. 98–106, 2019.
- [231] A. Bisantz, E. M. Roth et J. Watts-Englert, “Study and Analysis of Complex Cognitive Work,” dans Evaluation of Human Work, J. R. Wilson et S. Sharples, édit. CRC Press, mai 2015, p. 61–82.
- [232] J. Theureau, “Les entretiens d’autoconfrontation et de remise en situation par les traces matérielles et le programme de recherche « cours d’action »,” Revue d’anthropologie des connaissances, vol. 4, n°. 2, p. 287–322, sept. 2010.
- [233] A. V. Dhukaram et C. Baber, “A Systematic Approach for Developing Decision Aids : From Cognitive Work Analysis to Prototype Design and Development,” Systems Engineering, vol. 19, n°. 2, p. 79–100, 2016.
- [234] G. J. M. Read, P. M. Salmon et M. G. Lenné, “From work analysis to work design : A review of cognitive work analysis design applications,” Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 56, n°. 1, p. 368–372, sept. 2012.
- [235] R. Hoffman et S. Deal, “Influencing versus Informing Design, Part 1 : A Gap Analysis,” IEEE Intelligent Systems, vol. 23, n°. 5, p. 78–81, sept. 2008.
- [236] G. J. Read, P. M. Salmon et M. G. Lenne, “Cognitive work analysis and design : current practice and future practitioner requirements,” Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 16, n°. 2, p. 154–173, 2015.
- [237] B. Crandall, G. A. Klein et R. R. Hoffman, Working minds : A practitioner’s guide to cognitive task analysis. Mit Press, 2006.
- [238] P. Sanderson, “Understanding cognitive work,” dans Cognitive Systems Engineering. CRC Press, 2017, p. 99–116.

- [239] J. M. Flach, P. J. Stappers et F. A. Voorhorst, “Beyond affordances : Closing the generalization gap between design and cognitive science,” Design Issues, vol. 33, n°. 1, p. 76–89, 2017.
- [240] J. Everitt, S. Fletcher et A. Caird-Daley, “Task analysis of discrete and continuous skills : a dual methodology approach to human skills capture for automation,” Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 16, n°. 5, p. 513–532, 2015.
- [241] A. Shepherd, Hierarchical task analysis. Crc Press, 2003.
- [242] J. Rasmussen, “Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models,” IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, n°. 3, p. 257–266, 1983.
- [243] D. L. Phipps, G. H. Meakin et P. C. Beatty, “Extending hierarchical task analysis to identify cognitive demands and information design requirements,” Applied ergonomics, vol. 42, n°. 5, p. 741–748, 2011.
- [244] L. Hay, P. Cash et S. McKilligan, “The future of design cognition analysis,” Design Science, vol. 6, 2020.
- [245] J. Hyysalo, M. Oivo et P. Kuvaja, “A design theory for cognitive workflow systems,” International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, vol. 27, n°. 01, p. 125–151, 2017.
- [246] C. Chauvin, G. Le Bouar et C. Renault, “Integration of the human factor into the design and construction of fishing vessels,” Cognition, Technology & Work, vol. 10, n°. 1, p. 69–77, 2008.
- [247] R. Houghton, N. Balfe et J. R. Wilson, “Systems analysis and design,” Evaluation of human work, p. 221–248, 2015.
- [248] P. J. Smith, “Conceptual frameworks to guide design,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 12, n°. 1, p. 50–52, 2018.
- [249] H. A. Simon, The Sciences of the Artificial, reissue of the third edition with a new introduction by John Laird. MIT press, 2019.
- [250] W. Visser, “Designing as construction of representations : A dynamic viewpoint in cognitive design research,” Human–Computer Interaction, vol. 21, n°. 1, p. 103–152, 2006.
- [251] —, “La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations,” Le travail humain, vol. 72, n°. 1, p. 61–78, 2009.
- [252] F. Darses, P. Falzon et P. Béguin, “Collective design processes,” Proc. COOP’96, Juan Les Pins, p. 12–14, 01 1996.

- [253] W. Visser, “Conception individuelle et collective. approche de l’ergonomie cognitive,” Thèse de doctorat, INRIA, 2001.
- [254] K. Gurusamy, N. Srinivasaraghavan et S. Adikari, “An integrated framework for design thinking and agile methods for digital transformation,” dans International Conference of Design, User Experience, and Usability. Springer, 2016, p. 34–42.
- [255] “Problem Space versus Solution Space,” dans The Lean Product Playbook. John Wiley & Sons, Ltd, 2015, ch. 2, p. 13–22.
- [256] N. Crilly, “The evolution of “co-evolution”(part i) : Problem solving, problem finding, and their interaction in design and other creative practices,” She Ji : The Journal of Design, Economics, and Innovation, vol. 7, n°. 3, p. 309–332, 2021.
- [257] M. Du Plessis, “The role of knowledge management in innovation,” Journal of knowledge management, 2007.
- [258] C. McMahon, A. Lowe et S. Culley, “Knowledge management in engineering design : personalization and codification,” Journal of Engineering Design, vol. 15, n°. 4, p. 307–325, 2004.
- [259] L. Hay et al., “A systematic review of protocol studies on conceptual design cognition : Design as search and exploration,” Design Science, vol. 3, 2017.
- [260] S. P. Davies, “Characterizing the program design activity : Neither strictly top-down nor globally opportunistic,” Behaviour & Information Technology, vol. 10, n°. 3, p. 173–190, 1991.
- [261] L. J. Ball et B. T. Christensen, “Advancing an understanding of design cognition and design metacognition : Progress and prospects,” Design Studies, vol. 65, p. 35–59, 2019.
- [262] C. J. Dak, “Shared understanding on user knowledge in conceptual design stages : A comparative study between product design consultancies based in singapore and malaysia,” Thèse de doctorat, National University of Singapore (Singapore), 2020.
- [263] G. A. Boy, “Human-centered design of complex systems : An experience-based approach,” Design Science, vol. 3, 2017.
- [264] J. Van Kuijk, J. Daalhuizen et H. Christiaans, “Drivers of usability in product design practice : Induction of a framework through a case study of three product development projects,” Design Studies, vol. 60, p. 139–179, 2019.
- [265] V. Van der Linden, H. Dong et A. Heylighen, “Tracing architects’ fragile knowing about users in the socio-material environment of design practice,” Design Studies, vol. 63, p. 65–91, 2019.

- [266] J.-F. Bassereau et al., “Les objets intermédiaires de conception/design, instruments d’une recherche par le design,” Sciences du design, n°. 2, p. 48–63, 2015.
- [267] D. A. Norman, “Les artefacts cognitifs,” dans Les Objets Dans l’action : De La Maison Au Laboratoire, ser. Raisons Pratiques, B. Conein, N. Dodier et L. Thévenot, édit. Paris : Éditions de l’École des hautes études en sciences sociales, juill. 2020, p. 15–34.
- [268] E. Elias et M.-E. B. Chaumon, “Les objets intermédiaires de conception comme instruments de l’activité : quels apports dans une démarche de conception inclusive et participative de technologies ambiantes à destination des personnes fragilisées ?” Activités, n°. 19-1, 2022.
- [269] D. Vinck, “Taking intermediary objects and equipping work into account in the study of engineering practices,” Engineering Studies, vol. 3, n°. 1, p. 25–44, 2011.
- [270] J. Brooke et al., “Sus-a quick and dirty usability scale,” Usability evaluation in industry, vol. 189, n°. 194, p. 4–7, 1996.
- [271] B. Camburn et al., “Design prototyping methods : state of the art in strategies, techniques, and guidelines,” Design Science, vol. 3, 2017.
- [272] B. Edmonds et al., “Different modelling purposes,” Journal of Artificial Societies and Social Simulation, vol. 22, n°. 3, p. 6, 2019. [En ligne]. Disponible : <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/3/6.html>
- [273] S. Vålk, N. Maudet et C. Mougenot, “Exploring how boundary objects can support multidisciplinary design and science collaboration,” International Association of Societies of Design Research, 2019.
- [274] J.-C. Le Coze, “Visualising safety,” dans Safety Science Research. CRC Press, 2020, p. 151–171.
- [275] G. Mark, K. Lyytinen et M. Bergman, “Boundary objects in design : An ecological view of design artifacts,” Journal of the Association for Information Systems, vol. 8, n°. 11, p. 34, 2007.
- [276] C. Elsen, “La médiation par les objets en design industriel-perspectives pour l’ingénierie de conception,” 2011.
- [277] E. Särner et al., “Designing cockpit human-machine-interaction-the role of boundary objects and expanded rationality in complex system development,” dans ISPIM Conference Proceedings. The International Society for Professional Innovation Management (ISPIM), 2021, p. 1–14.
- [278] J.-C. Le Coze, “Outlines of a sensitising model for industrial safety assessment,” Safety Science, vol. 51, n°. 1, p. 187–201, janv. 2013.

- [279] S. Gregor et A. R. Hevner, "Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact," MIS Quarterly, vol. 37, n°. 2, p. 337–355, 2013.
- [280] D. G. Jansson et S. M. Smith, "Design fixation," Design Studies, vol. 12, n°. 1, p. 3–11, 1991.
- [281] N. Crilly, "Fixation and creativity in concept development : The attitudes and practices of expert designers," Design studies, vol. 38, p. 54–91, 2015.
- [282] I. Tseng et al., "The role of timing and analogical similarity in the stimulation of idea generation in design," Design studies, vol. 29, n°. 3, p. 203–221, 2008.
- [283] S. R. Daly et al., "Innovative solutions through innovated problems," International Journal of Engineering Education, vol. 34, n°. 2, p. 695 – 707, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044391008&partnerID=40&md5=326e92b399c85ad89bf695b5184a27d0>
- [284] E. M. Silk et al., "Problem framing and cognitive style : Impacts on design ideation perceptions," Design Studies, vol. 74, p. 101015, 2021.
- [285] W. Zhang et J. Ma, "Designing in complexity : how solution conjectures inform problem exploration," Proceedings of the Design Society, vol. 1, p. 1153–1162, 2021.
- [286] T. Kershaw, K. Holtta-Otto et Y. S. Lee, "The effect of prototyping and critical feedback on fixation in engineering design," dans Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society, vol. 33, n°. 33, 2011.
- [287] C. Toh, S. Miller et G. E. O. Kremer, "The role of personality and team-based product dissection on fixation effects," Advances in Engineering Education, vol. 3, n°. 4, 2013.
- [288] C. A. Toh et S. R. Miller, "The impact of example modality and physical interactions on design creativity," Journal of Mechanical Design, vol. 136, n°. 9, p. 091004, 2014.
- [289] M. G. Gomes et al., "Evaluation of physical models as creative stimuli in conceptual design of products," Design Studies, vol. 81, p. 101119, 2022.
- [290] V. K. Viswanathan et J. S. Linsey, "Physical Models and Design Thinking : A Study of Functionality, Novelty and Variety of Ideas," Journal of Mechanical Design, vol. 134, n°. 9, août 2012.
- [291] M. S. Silver et M. L. Markus, "Conceptualizing the sociotechnical (st) artifact," Systems, Signs & Actions, vol. 7, n°. 1, p. 82–89, 2013.
- [292] N. Ueno, R. Sawyer et Y. Moro, "Reconstitution of sociotechnical arrangements : Agency and the design of artifacts," Mind, Culture, and Activity, vol. 24, n°. 2, p. 95–109, 2017.

- [293] G. Goldkuhl, “The design of practice and the practice of design,” Systems, Signs & Actions, vol. 9, n°. 1, p. 1–8, 2015.
- [294] S. Sarker et al., “The sociotechnical axis of cohesion for the discipline : Its historical legacy and its continued relevance,” Mis Quarterly, vol. 43, n°. 3, p. 695–720, 2019.
- [295] C. Avgerou, “Contextual explanation : Alternative approaches and persistent challenges,” MIS Quarterly, vol. 43, n°. 3, p. 977–1006, 2019.
- [296] P. Lyle, H. Korsgaard et al., “What’s in an ecology ? a review of artifact, communicative, device and information ecologies,” dans Proceedings of the 11th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Shaping Experiences, Shaping Society, 2020, p. 1–14.
- [297] T. Clemmensen, Human Work Interaction Design : A Platform for Theory and Action. Springer, 2021.
- [298] G. J. Read et al., “A sociotechnical design toolkit for bridging the gap between systems-based analyses and system design,” Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, vol. 28, n°. 6, p. 327–341, 2018.
- [299] M. J. Miller et al., “Assessment of decision support systems for envisioned human extravehicular activity operations : From requirements to validation and verification,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 14, n°. 1, p. 54–74, 2020.
- [300] M.-E. Bobillier Chaumon et al., “De l’activité de simulation à l’activité en simulation : simuler pour stimuler,” Activités, vol. 15, n°. 15-1, 2018.
- [301] F. Vanderhaegen et al., “From human-systems integration to human-systems inclusion for use-centred inclusive manufacturing control systems,” IFAC-PapersOnLine, vol. 54, n°. 1, p. 249–254, 2021.
- [302] J. Recker et al., “Information systems as representations : A review of the theory and evidence,” Journal of the Association for Information Systems, vol. 20, n°. 6, p. Article–number, 2019.
- [303] A. Burton-Jones et al., “Assessing representation theory with a framework for pursuing success and failure,” MIS Quarterly, vol. 41, n°. 4, p. 1307–1333, 2017.
- [304] P. Faulkner et al., “Theorizing the digital object.” MIS Quarterly, vol. 43, n°. 4, 2019.
- [305] Y. Hui, On the existence of digital objects. U of Minnesota Press, 2016, vol. 48.
- [306] J. Porter, “100,000 free ai-generated headshots put stock photo companies on notice,” The Verge (<https://www.theverge>).

- [com/2019/9/20/20875362/100000-fake-ai-photos-stockphotography-royalty-free](https://www.gettyimages.com/2019/9/20/20875362/100000-fake-ai-photos-stockphotography-royalty-free), 2019.
- [307] N. Baudet, J. Maire et M. Pillet, “The visual inspection of product surfaces,” Food Quality and Preference, vol. 27, n°. 2, p. 153–160, mars 2013.
 - [308] X. Jiang, A. K. Gramopadhye * et B. J. Melloy, “Theoretical issues in the design of visual inspection systems,” Theoretical Issues in Ergonomics Science, vol. 5, n°. 3, p. 232–247, mai 2004.
 - [309] Ł. Grudzień et A. Hamrol, “Information quality in design process documentation of quality management systems,” International Journal of Information Management, vol. 36, n°. 4, p. 599–606, 2016.
 - [310] J. Aust, A. Mitrovic et D. Pons, “Assessment of the effect of cleanliness on the visual inspection of aircraft engine blades : An eye tracking study,” Sensors, vol. 21, n°. 18, p. 6135, 2021.
 - [311] S. Ackert, “Engine maintenance concepts for financiers,” Aircraft Monitor, vol. 2, p. 1–43, 2011.
 - [312] C. G. Drury et P. G. Dempsey, “Human factors and ergonomics audits,” Handbook of human factors and ergonomics, vol. 4, p. 1092–1121, 2012.
 - [313] C. G. Drury et J. Watson, “Good practices in visual inspection,” FAA/Human Factors in Aviation Maintenance, p. 90, 2002.
 - [314] F. W. Spencer, “Visual inspection research project report on benchmark inspections.” Sandia National Labs Albuquerque Nm Aging Aircraft Ndi Validation Center, Rapport technique, 1996.
 - [315] K. A. Latorella et P. V. Prabhu, “A review of human error in aviation maintenance and inspection,” Human Error in Aviation, p. 521–549, 2017.
 - [316] J. Aust, A. Mitrovic et D. Pons, “Comparison of visual and visual–tactile inspection of aircraft engine blades,” Aerospace, vol. 8, n°. 11, p. 313, 2021.
 - [317] C. Drury, “Human reliability in civil aircraft inspection,” State University of New York at Buffalo Department of Industrial Engineering, Rapport technique, 2001.
 - [318] B. M. Kleiner, C. G. Drury et G. L. Christopher, “Sensitivity of human tactile inspection,” Human factors, vol. 29, n°. 1, p. 1–7, 1987.
 - [319] J. E. See et al., “The Role of Visual Inspection in the 21th Century,” Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 61, n°. 1, p. 262–266, sept. 2017.

- [320] P. Ward et al., “Macro cognition : The science and engineering of sociotechnical work systems,” Frontiers in psychology, vol. 8, p. 515, 2017.
- [321] —, The Oxford handbook of expertise. Oxford University Press, 2019.
- [322] M. Land et B. Tatler, Looking and acting : vision and eye movements in natural behaviour. Oxford University Press, 2009.
- [323] C. G. Drury et P. Prabhu, “Information requirements of aircraft inspection : framework and analysis,” International Journal of Human-Computer Studies, vol. 45, n°. 6, p. 679–695, 1996.
- [324] R. R. Hoffman et L. G. Militello, Perspectives on cognitive task analysis : Historical origins and modern communities of practice. Psychology Press, 2008.
- [325] F. Daniellou, “Automatize what : Facts or fiction,” dans New techniques and Ergonomics. Hermes, 1987, p. 229–234.
- [326] A. S. Benjamin, M. Diaz et S. Wee, “Signal detection with criterion noise : Applications to recognition memory,” Psychological review, vol. 116, n°. 1, p. 84–115, janv. 2009.
- [327] D. Slaughter et al., “Comparison of instrumental and manual inspection of clingstone peaches,” Applied Engineering in Agriculture, vol. 22, n°. 6, p. 883–889, 2006.
- [328] M. Carrasco, L. Pizarro et D. Mery, “Visual inspection of glass bottlenecks by multiple-view analysis,” International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 23, n°. 10, p. 925–941, 2010.
- [329] H. Son et al., “Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems,” Automation in Construction, vol. 42, p. 13–24, 2014.
- [330] M. R. Halfawy et J. Hengmeechai, “Integrated vision-based system for automated defect detection in sewer closed circuit television inspection videos,” Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 29, n°. 1, p. 04014024, 2015.
- [331] S. Kirstein et al., “Robust adaptive flow line detection in sewer pipes,” Automation in construction, vol. 21, p. 24–31, 2012.
- [332] M.-P. Pacaux-Lemoine et al., “Towards human-based industrial cyber-physical systems,” dans 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS). IEEE, 2018, p. 615–620.
- [333] C. Stephanidis et al., “Seven hci grand challenges,” International Journal of Human-Computer Interaction, vol. 35, n°. 14, p. 1229–1269, 2019.
- [334] J. W. Creswell et C. N. Poth, Qualitative inquiry and research design : Choosing among five approaches. Sage publications, 2016.

- [335] K. Peffers et al., “A design science research methodology for information systems research,” Journal of management information systems, vol. 24, n°. 3, p. 45–77, 2007.
- [336] M. K. Sein et al., “Action design research,” MIS quarterly, vol. 35, n°. 1, p. 37–56, 2011.
- [337] P. Salembier et I. Wagner, “Studies of work ‘in the wild’,” Computer Supported Cooperative Work (CSCW), p. 1–20, 2021.
- [338] F. Guérin et al., “Understanding and transforming work : the practice of ergonomics,” ANACT Network Editions, Lyon, 2007.
- [339] G. Klein, “A naturalistic decision making perspective on studying intuitive decision making,” Journal of Applied Research in Memory and Cognition, vol. 4, n°. 3, p. 164–168, sept. 2015.
- [340] E. Hutchins, “Distributed cognition,” International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences. Elsevier Science, vol. 138, 2000.
- [341] P. Salembier, “Cognition (s) : située, distribuée, socialement partagée, etc,” Bulletin du LCPE, vol. 1, p. 1–13, 1996.
- [342] J. W. Creswell, Research design : Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Sage, 2018.
- [343] A. M. Bisantz et al., “Integrating cognitive analyses in a large-scale system design process,” International Journal of Human-Computer Studies, vol. 58, n°. 2, p. 177–206, 2003. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1071581902001301>
- [344] É. Loup-Escande, J.-M. Burkhardt et S. Richir, “Anticiper et évaluer l’utilité dans la conception ergonomique des technologies émergentes : Une revue,” Le travail humain, vol. 76, n°. 1, p. 27–55, 2013.
- [345] P. Y. Simard et al., “Machine Teaching : A New Paradigm for Building Machine Learning Systems,” arXiv :1707.06742 [cs, stat], août 2017.
- [346] R.-A. Thiétart, Méthodes de recherche en management-4ème édition. Dunod, 2014.
- [347] M. C. Tremblay, A. R. Hevner et D. J. Berndt, “Focus groups for artifact refinement and evaluation in design research,” Communications of the association for information systems, vol. 26, n°. 1, p. 27, 2010.
- [348] D. Long et B. Magerko, “What is ai literacy ? competencies and design considerations,” dans Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems, 2020, p. 1–16.

- [349] M. C. Bateson, "The double bind : Pathology and creativity," Cybernetics & Human Knowing, vol. 12, n°. 1-2, p. 11–21, 2005.
- [350] R. C. Nickerson, U. Varshney et J. Muntermann, "A method for taxonomy development and its application in information systems," European Journal of Information Systems, vol. 22, n°. 3, p. 336–359, 2013.
- [351] M. A. Cohen, N. Agrawal et V. Agrawal, "Winning in the Aftermarket," Harvard Business Review, n°. May 2006, mai 2006.
- [352] CRIAQ, "SARA Project Research Proposal (signed) : Automated Visual Inspection, Sentencing & Dressing for Aerospace Components," Consortium for Aerospace Research and Innovation in Quebec, Rapport technique Manu-1712, 2018.
- [353] A. Muñoz et D. Morwood, "A Circular Economy Business Model Case," Universidade de Santiago de Compostela. Departamento de Economía Aplicada, Rapport technique, 2020.
- [354] Rolls-Royce Holdings plc, "Rolls-Royce Holdings plc Annual Report," Coran Design Group, Rapport technique, 2019.
- [355] P. Johnston, "The aero engine business model : Rolls royce's perspective," dans Supply Chain Integration Challenges in Commercial Aerospace, K. Richter et J. Walther, édit. Cham : Springer International Publishing, 2017, p. 237–248.
- [356] G. Klein et al., "Ten challenges for making automation a "team player" in joint human-agent activity," IEEE Intelligent Systems, vol. 19, n°. 6, p. 91–95, nov. 2004.
- [357] I. Rahwan et al., "Machine behaviour," Nature, vol. 568, n°. 7753, p. 477–486, avr. 2019.
- [358] J. M. Flach et al., "Decisionmaking in practice : The dynamics of muddling through," Applied Ergonomics, vol. 63, p. 133–141, sept. 2017.
- [359] H. A. Abbass, "Social Integration of Artificial Intelligence : Functions, Automation Allocation Logic and Human-Autonomy Trust," Cognitive Computation, vol. 11, n°. 2, p. 159–171, avr. 2019.
- [360] F. Belkadi et al., "Intelligent assistant system as a context-aware decision-making support for the workers of the future," Computers & Industrial Engineering, p. 105732, févr. 2019.
- [361] F. Scheller, S. Johanning et T. Bruckner, "A review of designing empirically grounded agent-based models of innovation diffusion : Development process, conceptual foundation and research agenda," Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Research Report 01/2019, 2019.

- [362] A. M. Madni et M. Sievers, “Model-based systems engineering : Motivation, current status, and research opportunities,” Systems Engineering, vol. 21, n°. 3, p. 172–190, 2018.
- [363] R. Hartson et P. S. Pyla, The UX Book : Process and guidelines for ensuring a quality user experience. Elsevier, 2012.
- [364] S. Pilemalm et al., “Integrating the rational unified process and participatory design for development of socio-technical systems : a user participative approach,” Design Studies, vol. 28, n°. 3, p. 263–288, 2007.
- [365] C.-F. Chi et C. Drury, “Do people choose an optimal response criterion in an inspection task ?” IIE Transactions, vol. 30, n°. 3, p. 257–266, 1998.
- [366] C. Emmenegger et D. Norman, “The challenges of automation in the automobile,” Ergonomics, vol. 62, n°. 4, p. 512–513, avr. 2019.
- [367] J. M. Schraagen, J. Diggelen et al., “A brief history of the relationship between expertise and artificial intelligence,” Expertise at Work : Current and Emerging Trends, p. 149, 2021.
- [368] E. M. Roth et al., “A work-centered approach to system user-evaluation,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 15, n°. 4, p. 155–174, 2021.
- [369] S. E. Hashemi-Petroodi et al., “Workforce reconfiguration strategies in manufacturing systems : a state of the art,” International Journal of Production Research, vol. 59, n°. 22, p. 6721–6744, 2021.
- [370] A. Dolgui, F. Sgarbossa et M. Simonetto, “Design and management of assembly systems 4.0 : systematic literature review and research agenda,” International Journal of Production Research, vol. 60, n°. 1, p. 184–210, 2022.
- [371] C. B. Frey et M. A. Osborne, “The future of employment : How susceptible are jobs to computerisation ?” Technological forecasting and social change, vol. 114, p. 254–280, 2017.
- [372] M. Johnson, M. Vignati et D. Duran, “Understanding human-autonomy teaming through interdependence analysis,” dans Symp. Hum. Auton. Teaming, 2018, p. 1–20.
- [373] Ferraz G. T. et al., “State-of-the-Art Review of Building Inspection Systems,” Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 30, n°. 5, p. 04016018, oct. 2016.
- [374] S. Jordan et al., “State-of-the-art technologies for UAV inspections,” IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 12, n°. 2, p. 151–164, févr. 2018.
- [375] M. K. Sein et M. Rossi, “Elaborating adr while drifting away from its essence : A commentary on mullarkey and hevner,” European Journal of Information Systems, vol. 28, n°. 1, p. 21–25, 2019.

- [376] G. Cabour, É. Ledoux et S. Bassetto, “A Work-Centered Approach for Cyber-Physical-Social System Design : Applications in Aerospace Industrial Inspection,” arXiv :2101.05385 [cs], janv. 2021.
- [377] R. S. Kenett, R. S. Swarz et A. Zonnenshain, Systems engineering in the fourth industrial revolution : Big data, novel technologies, and modern systems engineering. John Wiley & Sons, 2019.
- [378] P. Falzon, Constructive ergonomics. CRC Press, 2015.
- [379] M. M. Nyre-Yu, “Determining system requirements for human-machine integration in cyber security incident response,” Thèse de doctorat, Purdue University Graduate School, 2019.
- [380] M. Nyre-Yu, “Identifying expertise gaps in cyber incident response : Cyber defender needs vs. technological development,” dans Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences, 2021, p. 1978.
- [381] M. Arntz, G. Terry et U. Zierahn, “The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries : A Comparative Analysis,” OECD Social, Employment and Migration Working Papers, Rapport technique 189, 2016.
- [382] A. I. Roadmap, “A human-centric approach to ai in aviation,” European Aviation Safety Agency, Rapport technique, 2020.
- [383] D. T. K. Ng et al., “Conceptualizing ai literacy : An exploratory review,” Computers and Education : Artificial Intelligence, vol. 2, p. 100041, 2021.
- [384] P. J. Smith et E. Baumann, “Human-automation teaming : unintended consequences of automation on user performance,” dans 2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE, 2020, p. 1–9.
- [385] F. Rajabiyazdi et G. A. Jamieson, “A review of transparency (seeing-into) models,” dans 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). IEEE, 2020, p. 302–308.
- [386] S. T. Mueller et al., “Explanation in Human-AI Systems : A Literature Meta-Review, Synopsis of Key Ideas and Publications, and Bibliography for Explainable AI,” arXiv :1902.01876 [cs], févr. 2019.
- [387] C. M. Cuttillo et al., “Machine intelligence in healthcare—perspectives on trustworthiness, explainability, usability, and transparency,” npj Digital Medicine, vol. 3, n°. 1, p. 1–5, mars 2020.
- [388] A. D. Selbst et al., “Fairness and Abstraction in Sociotechnical Systems,” dans Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency, ser.

- FAT* '19. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, janv. 2019, p. 59–68.
- [389] M. Ribera et A. Lapedriza, “Can we do better explanations? A proposal of User-Centered Explainable AI,” Los Angeles, p. 7, 2019.
 - [390] B. Vasey et al., “DECIDE-AI : New reporting guidelines to bridge the development-to-implementation gap in clinical artificial intelligence,” Nature Medicine, vol. 27, n°. 2, p. 186–187, févr. 2021.
 - [391] I. Seeber et al., “Machines as teammates : A research agenda on ai in team collaboration,” Information & management, vol. 57, n°. 2, p. 103174, 2020.
 - [392] J. Y. Chen et M. J. Barnes, “Human-agent teaming for multirobot control : A review of human factors issues,” IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 44, n°. 1, p. 13–29, 2014.
 - [393] G. Matthews et al., “Super-machines or sub-humans : Mental models and trust in intelligent autonomous systems,” dans Trust in Human-Robot Interaction. Elsevier, 2021, p. 59–82.
 - [394] W. J. Clancey, “The epistemology of a rule-based expert system —a framework for explanation,” Artificial Intelligence, vol. 20, n°. 3, p. 215–251, mai 1983.
 - [395] J. D. Moore et W. R. Swartout, “Explanation in expert systems : A survey,” University of southern california marina del rey information sciences inst, Rapport technique, 1988.
 - [396] E. M. Roth, K. B. Bennett et D. D. Woods, “Human interaction with an “intelligent” machine,” International Journal of Man-Machine Studies, vol. 27, n°. 5, p. 479–525, nov. 1987.
 - [397] M. Lewis, H. Li et K. Sycara, “Deep learning, transparency, and trust in human robot teamwork,” dans Trust in Human-Robot Interaction. Elsevier, 2021, p. 321–352.
 - [398] I. Habli, T. Lawton et Z. Porter, “Artificial intelligence in health care : accountability and safety,” Bulletin of the World Health Organization, vol. 98, n°. 4, p. 251, 2020.
 - [399] T. Shmelova, A. Sterenharz et S. Dolgikh, “Artificial intelligence in aviation industries : Methodologies, education, applications, and opportunities,” dans Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. IGI Global, 2020, p. 1–35.
 - [400] V. Mnih et al., “Human-level control through deep reinforcement learning,” nature, vol. 518, n°. 7540, p. 529–533, 2015.
 - [401] G. Marcus et E. Davis, Rebooting AI : Building artificial intelligence we can trust. Pantheon, 2019.

- [402] S. Lapuschkin et al., “Unmasking Clever Hans predictors and assessing what machines really learn,” Nature Communications, vol. 10, n°. 1, p. 1096, mars 2019.
- [403] J. Akatsuka et al., “Illuminating Clues of Cancer Buried in Prostate MR Image : Deep Learning and Expert Approaches,” Biomolecules, vol. 9, n°. 11, oct. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6920905/>
- [404] R. Tomsett et al., “Why the Failure? How Adversarial Examples Can Provide Insights for Interpretable Machine Learning,” dans 2018 21st International Conference on Information Fusion (FUSION), juill. 2018, p. 838–845.
- [405] H. Lakkaraju, S. H. Bach et J. Leskovec, “Interpretable decision sets : A joint framework for description and prediction,” dans Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining, 2016, p. 1675–1684.
- [406] A. Pekka et al., “The european commission’s high-level expert group on artificial intelligence : Ethics guidelines for trustworthy ai,” Working Document for stakeholders’ consultation. Brussels, p. 1–37, 2018.
- [407] K. Yeung, “Recommendation of the council on artificial intelligence (oecd),” International Legal Materials, vol. 59, n°. 1, p. 27–34, 2020.
- [408] C. Xiao et al., “Generating Adversarial Examples with Adversarial Networks,” arXiv :1801.02610 [cs, stat], févr. 2019, arXiv : 1801.02610. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/1801.02610>
- [409] A. Morales-Forero et S. Bassetto, “Case study : A semi-supervised methodology for anomaly detection and diagnosis,” dans 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, 2019, p. 1031–1037.
- [410] G. Fidel, R. Bitton et A. Shabtai, “When Explainability Meets Adversarial Learning : Detecting Adversarial Examples using SHAP Signatures,” arXiv :1909.03418 [cs, stat], sept. 2019, arXiv : 1909.03418. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/1909.03418>
- [411] F. Tramer et D. Boneh, “Adversarial training and robustness for multiple perturbations,” arXiv preprint arXiv :1904.13000, 2019.
- [412] S. Mor-Yosef et al., “Ranking the risk factors for cesarean : logistic regression analysis of a nationwide study,” Obstetrics and Gynecology, vol. 75, n°. 6, p. 944–947, juin 1990.
- [413] J. L. Kobrin et al., “AN INVESTIGATION OF THE FIT OF LINEAR REGRESSION MODELS TO DATA FROM AN SAT[®] VALIDITY STUDY,” ETS Research Report Series, vol. 2011, n°. 1, p. i–21, juin 2011. [En ligne]. Disponible : <http://doi.wiley.com/10.1002/j.2333-8504.2011.tb02255.x>

- [414] C. Rudin, “Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead,” Nature Machine Intelligence, vol. 1, n^o. 5, p. 206–215, 2019.
- [415] S. M. Lundberg et S.-I. Lee, “A unified approach to interpreting model predictions,” dans Advances in neural information processing systems, 2017, p. 4765–4774.
- [416] M. T. Ribeiro, S. Singh et C. Guestrin, “"why should i trust you?" explaining the predictions of any classifier,” dans Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining, 2016, p. 1135–1144.
- [417] R. Konig, U. Johansson et L. Niklasson, “G-rex : A versatile framework for evolutionary data mining,” dans 2008 IEEE International Conference on Data Mining Workshops. IEEE, 2008, p. 971–974.
- [418] A. Henelius, K. Puolamäki et A. Ukkonen, “Interpreting classifiers through attribute interactions in datasets,” arXiv preprint arXiv :1707.07576, 2017.
- [419] S. Rathi, “Generating counterfactual and contrastive explanations using shap,” arXiv preprint arXiv :1906.09293, 2019.
- [420] D. Ašeriškis et R. Damaševičius, “Gamification of a project management system,” dans Proc. of Int. Conference on Advances in Computer-Human Interactions ACHI2014. Citeseer, 2014, p. 200–207.
- [421] A. Shahri et al., “Towards a code of ethics for gamification at enterprise,” dans IFIP working conference on the practice of enterprise modeling. Springer, 2014, p. 235–245.
- [422] F. Doshi-Velez et B. Kim, “Towards A Rigorous Science of Interpretable Machine Learning,” arXiv :1702.08608 [cs, stat], mars 2017.
- [423] M. Naiseh et al., “Personalising explainable recommendations : literature and conceptualisation,” dans World Conference on Information Systems and Technologies. Springer, 2020, p. 518–533.
- [424] S. Mohseni, N. Zarei et E. D. Ragan, “A Multidisciplinary Survey and Framework for Design and Evaluation of Explainable AI Systems,” arXiv :1811.11839 [cs], avr. 2020, arXiv : 1811.11839. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/1811.11839>
- [425] L. Sanneman et J. A. Shah, “A Situation Awareness-Based Framework for Design and Evaluation of Explainable AI,” dans Explainable, Transparent Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, D. Calvaresi et al., édit. Cham : Springer International Publishing, 2020, p. 94–110.
- [426] A. Crabtree, M. Rouncefield et P. Tolmie, “Informing design,” dans Doing Design Ethnography. Springer, 2012, p. 135–158.

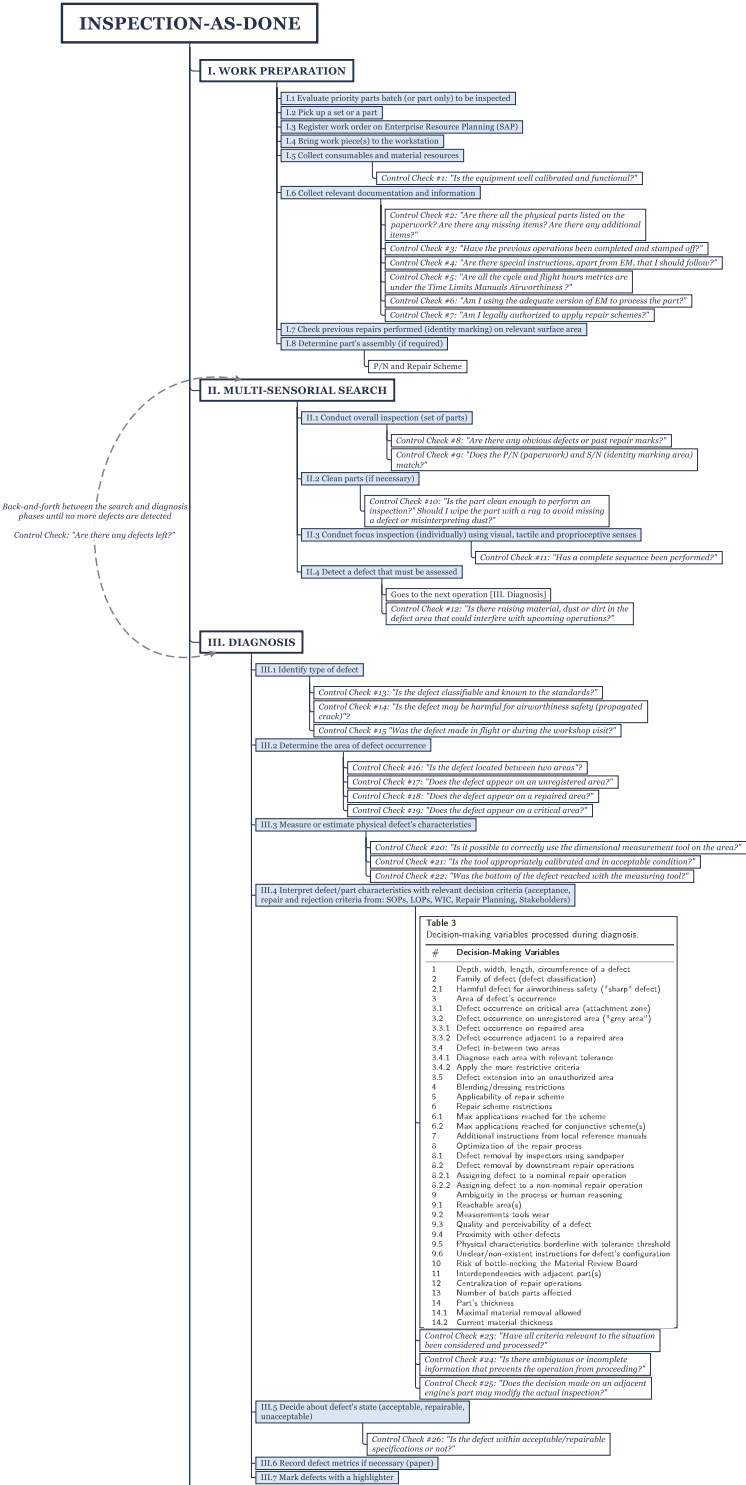
- [427] C. E. Zsombok et G. Klein, Naturalistic decision making. Psychology Press, 2014.
- [428] M. R. Endsley et al., “Cognitive engineering and decision making : An overview and future course,” Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, vol. 1, n^o. 1, p. 1–21, 2007.
- [429] G. Cabour, É. Ledoux et S. Bassetto, “Extending System Performance Past the Boundaries of Technical Maturity : Human-Agent Teamwork Perspective for Industrial Inspection,” arXiv :2102.03241 [cs], févr. 2021.
- [430] S. Friedman, K. Forbus et B. Sherin, “Representing, running, and revising mental models : A computational model,” Cognitive science, vol. 42, n^o. 4, p. 1110–1145, 2018.
- [431] A. Shepherd et R. B. Stammers, “Task analysis,” dans Evaluation of Human Work, J. R. Wilson et S. Sharples, édit. CRC Press, mai 2015, p. 139–162.
- [432] J. Y. Chen et al., “Situation awareness-based agent transparency,” Army research lab aberdeen proving ground md human research and engineering . . . , Rapport technique, 2014.
- [433] A. D. Preece et al., “Stakeholders in explainable AI,” CoRR, vol. abs/1810.00184, 2018. [En ligne]. Disponible : <http://arxiv.org/abs/1810.00184>
- [434] M. Demir, N. J. McNeese et N. J. Cooke, “Understanding human-robot teams in light of all-human teams : Aspects of team interaction and shared cognition,” International Journal of Human-Computer Studies, vol. 140, p. 102436, 2020.
- [435] F. Poursabzi-Sangdeh et al., “Manipulating and measuring model interpretability,” dans Proceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems, 2021, p. 1–52.
- [436] M. Langer et R. N. Landers, “The future of artificial intelligence at work : A review on effects of decision automation and augmentation on workers targeted by algorithms and third-party observers,” Computers in Human Behavior, vol. 123, p. 106878, 2021.
- [437] D. Lockton et al., “Tangible thinking : Materializing how we imagine and understand systems, experiences, and relationships,” dans RSD8 : Relating Systems Thinking and Design Symposium, 2019, 2019.
- [438] M. Mitchell et al., “Model cards for model reporting,” dans Proceedings of the conference on fairness, accountability, and transparency, 2019, p. 220–229.
- [439] M. Muller et al., “Designing ground truth and the social life of labels,” dans Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2021, p. 1–16.
- [440] A. Morales-Forero, S. Bassetto et E. Coatanea, “Ai interpretable models for high-stake decisions based on concepts and context,” 2021, unpublished.

- [441] I. Ahmed, G. Jeon et F. Piccialli, “From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in industry 4.0 : A survey on what, how, and where,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022.
- [442] I. Nunes et D. Jannach, “A systematic review and taxonomy of explanations in decision support and recommender systems,” User Modeling and User-Adapted Interaction, vol. 27, n^o. 3, p. 393–444, 2017.
- [443] R. Haberfellner et al., “Process models : Systems engineering and others,” dans Systems Engineering. Springer, 2019, p. 27–98.
- [444] K. B. Lewis et al., “Writing a compelling integrated discussion : a guide for integrated discussions in article-based theses and dissertations,” International Journal of Nursing Education Scholarship, vol. 18, n^o. 1, 2021.
- [445] M. Moencks et al., “Augmented workforce canvas : a management tool for guiding human-centric, value-driven human-technology integration in industry,” Computers & Industrial Engineering, vol. 163, p. 107803, 2022.
- [446] F. Barcellini, “The design of “future work” in industrial contexts,” dans Managing Future Challenges for Safety. Springer, 2022, p. 75–83.
- [447] A. Reiman et al., “Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context—a scoping review,” Technology in Society, vol. 65, p. 101572, 2021.
- [448] J. Village et al., “Design for human factors (dfhf) : a grounded theory for integrating human factors into production design processes,” Ergonomics, vol. 58, n^o. 9, p. 1529–1546, 2015.
- [449] J. S. Gero et J. Kan, “Empirical results from measuring design creativity : Use of an augmented coding scheme in protocol analysis,” dans DS86 : Proceedings of The Fourth International Conference on Design Creativity, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, 2016.
- [450] J. Gero et J. Milovanovic, “Creation and characterization of design spaces,” dans Proceedings of DRS 2022 : Design Research Society International Conference, Bilbao, Spain, 2022.
- [451] J. Nickel, P. R. Duimering et A. Hurst, “Manipulating the design space to resolve trade-offs : Theory and evidence,” Design Studies, vol. 79, p. 101095, 2022.
- [452] P. Ralph, “The sensemaking-coevolution-implementation theory of software design,” Science of Computer Programming, vol. 101, p. 21–41, 2015.
- [453] N. Crilly, “The evolution of “co-evolution”(part ii) : The biological analogy, different kinds of co-evolution, and proposals for conceptual expansion,” She Ji : The Journal of Design, Economics, and Innovation, vol. 7, n^o. 3, p. 333–355, 2021.

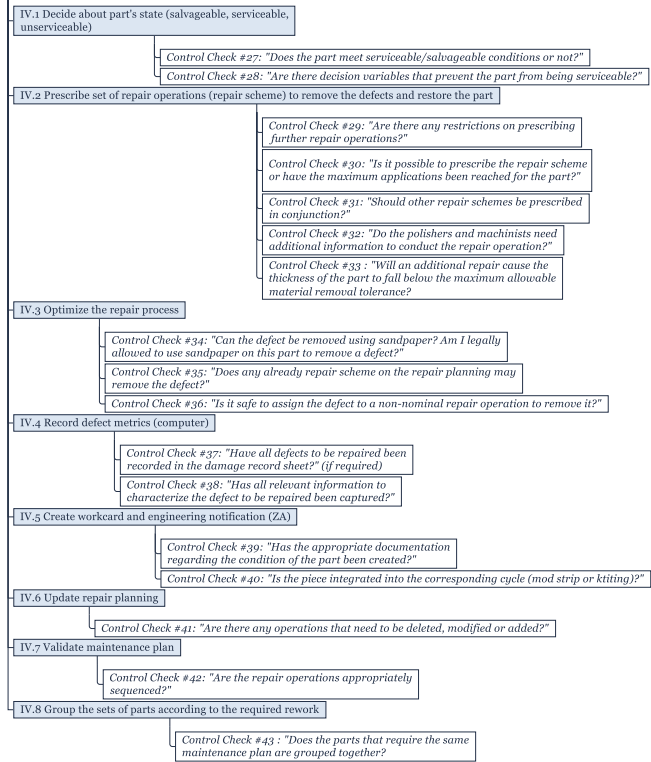
- [454] J. M. Flach et K. B. Bennett, “Improving sensemaking through the design of representations,” dans Cognitive Systems Engineering. CRC Press, 2017, p. 165–180.
- [455] R. Kitchin, “Thinking critically about and researching algorithms,” Information, communication & society, vol. 20, n^o. 1, p. 14–29, 2017.
- [456] S. Bailey et al., “Dismembering organisation : The coordination of algorithmic work in healthcare,” Current Sociology, vol. 68, n^o. 4, p. 546–571, 2020.
- [457] P. Falzon, “La construction des connaissances en ergonomie : éléments d’épistémologie,” Actes du XXXIIe Congrès de la SELF, p. 641–654, 1997.
- [458] A. S. Lee et R. L. Baskerville, “Generalizing generalizability in information systems research,” Information systems research, vol. 14, n^o. 3, p. 221–243, 2003.
- [459] E. W. Tsang, “Generalizing from research findings : The merits of case studies,” International Journal of Management Reviews, vol. 16, n^o. 4, p. 369–383, 2014.
- [460] P. Béguin, “L’ergonome, acteur de la conception,” dans Ergonomie, ser. Hors collection. Paris cedex 14 : Presses Universitaires de France, 2004, p. 375–390.
- [461] P. J. Ågerfalk, “Stimulating academic discourse : a call for response,” 2019.
- [462] C. Bareil, “Démystifier la résistance au changement,” Telescope, vol. 14, n^o. 3, p. 98–105, 2008.
- [463] T. Weillkiens, Systems engineering with SysML/UML : modeling, analysis, design. Elsevier, 2011.
- [464] A. U. Din et A. Adnan, “Text to code : Pseudo code generation,” dans Context-Aware Systems and Applications, and Nature of Computation and Communication. Springer, 2019, p. 20–37.
- [465] J.-C. Sperandio, “2. Modèles et formalismes, ou le fond et la forme,” dans Formalismes de modélisation pour l’analyse du travail et l’ergonomie, ser. Le Travail humain. Paris cedex 14 : Presses Universitaires de France, 2015, p. 27–75.
- [466] P. M. Salmon et al., Handbook of Systems Thinking Methods. CRC Press, 2022.
- [467] Z. Akata et al., “A research agenda for hybrid intelligence : augmenting human intellect with collaborative, adaptive, responsible, and explainable artificial intelligence,” Computer, vol. 53, n^o. 08, p. 18–28, 2020.
- [468] R. G. Eggleston, “Work-centered design : A cognitive engineering approach to system design,” dans Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol. 47, n^o. 3. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2003, p. 263–267.

- [469] M. A. Neerincx et al., “Socio-cognitive engineering of a robotic partner for child’s diabetes self-management,” Frontiers in Robotics and AI, vol. 6, p. 118, 2019.
- [470] J.-M. Robert et al., “Prospective ergonomics in service of technological innovation,” dans Digital Transformations in the Challenge of Activity and Work : Understanding and Supporting Technological Changes. Wiley Online Library, 2021, p. 195–210.
- [471] P. Hemmer et al., “Human-ai complementarity in hybrid intelligence systems : A structured literature review.” PACIS, p. 78, 2021.
- [472] J. Morley et al., “From what to how : an initial review of publicly available ai ethics tools, methods and research to translate principles into practices,” Science and engineering ethics, vol. 26, n^o. 4, p. 2141–2168, 2020.
- [473] B. Mittelstadt, “Principles alone cannot guarantee ethical ai,” Nature Machine Intelligence, vol. 1, n^o. 11, p. 501–507, 2019.

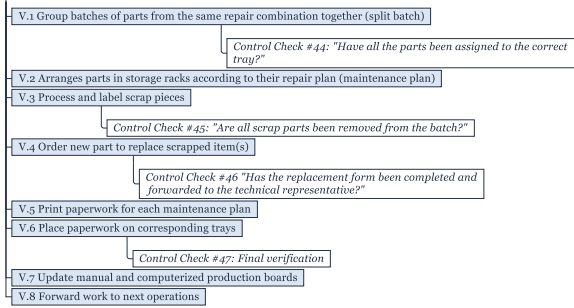
ANNEXE A SYSTEMIC ACTIVITY MODEL WITH TASK DECOMPOSITION AND DECISION CUES



IV. EXECUTION



V. WORK COMPLETION



ANNEXE B EXCERPT OF FUNCTIONS AND TECHNOLOGICAL COVERAGE TABLE

TABLEAU B.1 Diagnosis table showing the technological coverage and type of functions.

Function	Techno. coverage	Type
I. Work Preparation		
1. Collect and process relevant data and information	Yes (limited extend)	Hybrid function with manual input
2. Assess the quantity of repairs operation allowed by areas (DMV #4 -blending/polishing restrictions)	No	Human function
3. Check correspondence between the information on paperwork, the physical part and computer procedures	No	Human function
II. Multi-sensorial search		
4. Detect eliminatory defects (cracks, burnt zone)	Yes (limited extend)	Hybrid function without manual input
5. Detect minor defects	Yes (limited extend)	Hybrid function without manual input
III. Diagnosis		
6. Classify defect type (DMV #2 – Types of defect)	Yes (limited extend)	Hybrid function with manual input
7. Defect measurement (DMV #1 – Physical characteristics)	Yes	Autonomy function
8. Measure part's thickness (DMV #14 - Part's thickness)	No	Hybrid function without manual input
9. Identify previous repair operation	No	Human Function
10. Sentence defect in previous repaired area	Yes (limited extend)	Hybrid function with manual input
IV. Execution		
11. Prescribe required repair schemes	No	Human Function
12. Data record	Yes	Autonomy function
...	...	..

ANNEXE C ÉCHANGE D'INFORMATIONS ENTRE INSPECTEURS ET AUTRES OPÉRATEURS DE MAINTENANCE AÉRONAUTIQUE

SAP study: information exchange among inspectors/polishers

Type of information exchanged with examples

Type of information	Example
Type of damage	'Galling'; 'Nick'
Number of damages	'NickS'; 'DamageS'; 'Remove Tip Rub on Qty:2'
Depth acceptance threshold	'Max depth allowed 0.020"
Location(s)	'Airfoil'; 'L/E'; 'Polish Root [...] Polish Tip'
Depth of damage	'Actual depth of galling is less than 0.004"
Number of parts concerned	'S/N RGE46092 only'
Additional information to check	'See ZA 429316816'
Repair scheme constraint	'Dressing must be done only once in a damaged area'
Location restriction (economic criteria)	'Restore L/E only'
Type of repair	'Deburr Tip as marked'; 'Tip crop'
Serial number of part(s) concerned	'Polish damage on T/E as mark on blades S/N 20254RGE3897'
Assessment confirmation (borderline defects)	'The blades have been inspected and are within the above specified limits. Continue with BRG1027'

Upstream operation carried out by inspectors before transferring data

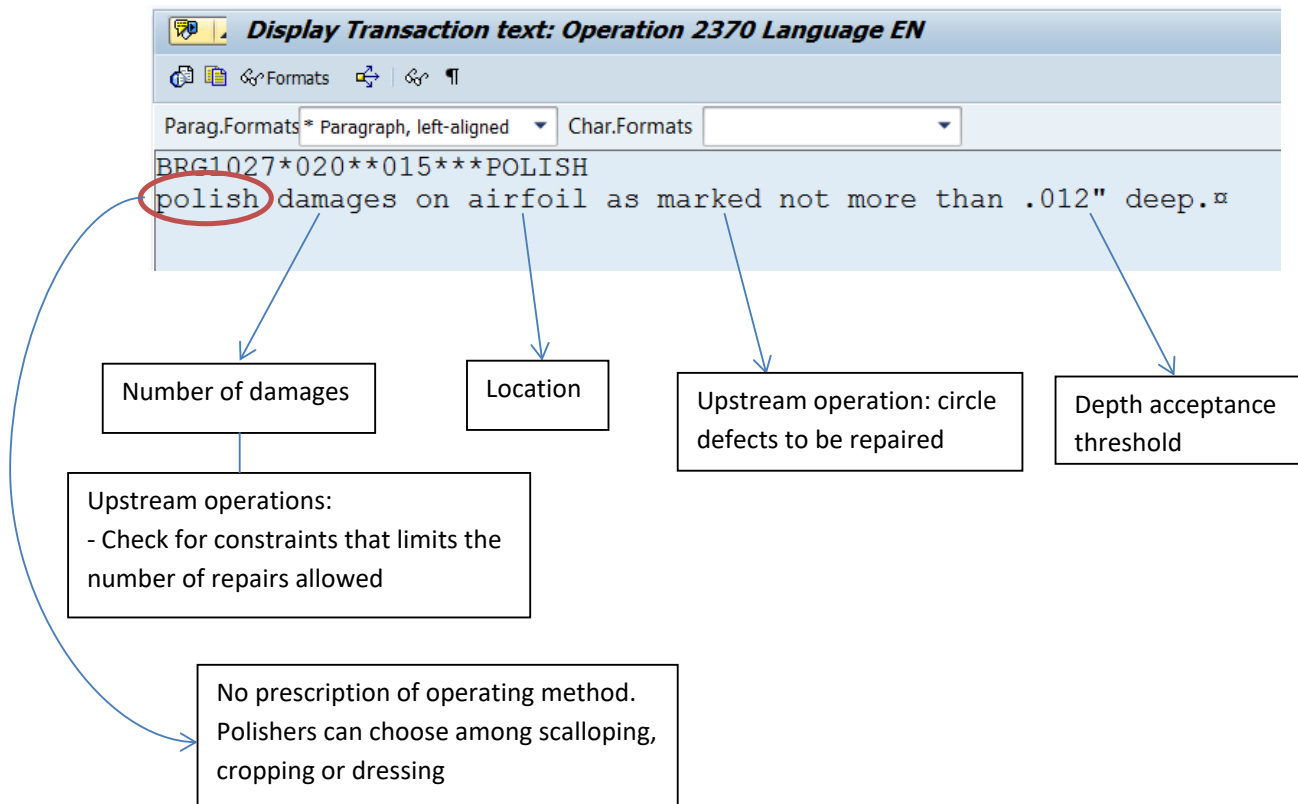
Type of data	Upstream operation achieved
Number of damages	Check for constraints that limits the number of repairs allowed
'As marked'; 'As indicated'	Circle the defects to repair
'Polish damages'	No prescription of operating method. Polishers can choose among scalloping, cropping and dressing
'Crop Tip'	Prescribed repair method based on damage's characteristic & location
Type of defect	Defect classification
Depth of damage	Judge or dimensionally measure depth of defects
Location restriction ('L/E only')	Ensure that the area doesn't need to be repaired. In this case, "L/E only" means that the inspector considered the T/E to be acceptable or that defects were manually repaired
Lab request	Inspector estimated that it wasn't possible to assess a defect in a previously polished area

Study on Long text log for BRG1448

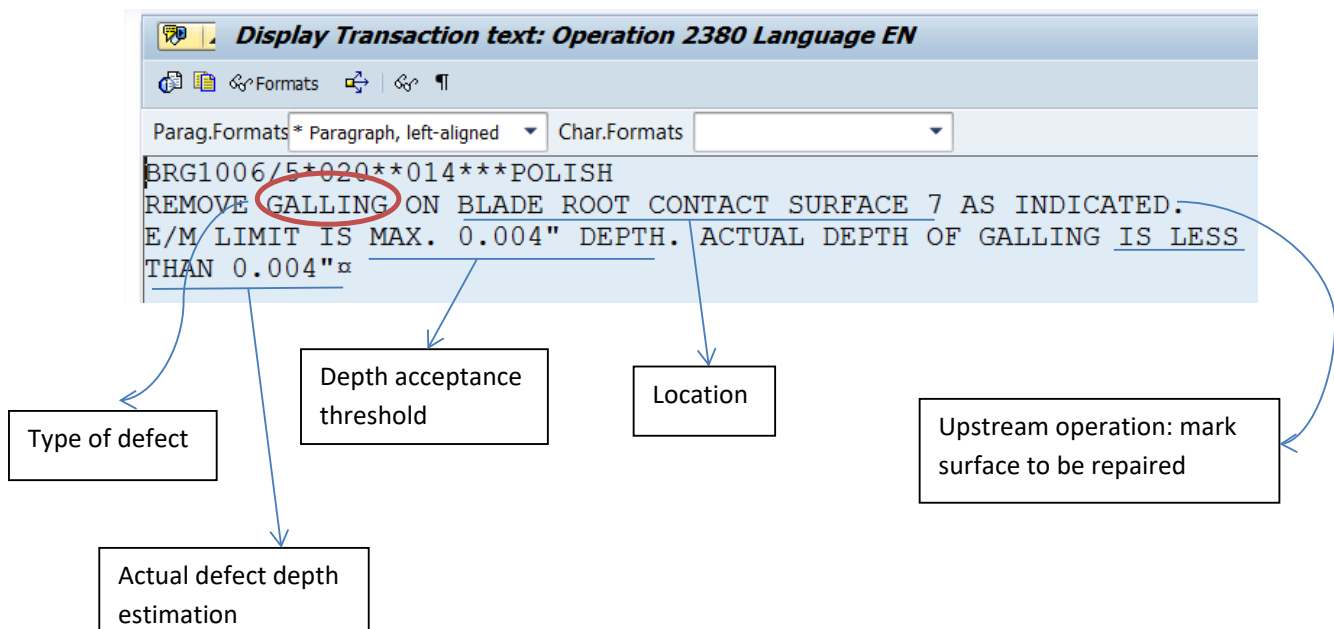
Scheme targeted	BRG1448 (BR710 engine) – 'Restore L/E and T/E profile'
Study range	9 months
Number of sets analysed	124
Number of sets containing long text entries, i.e. 'Restore L/E only'	13
Result (percentage)	10.5%
Interpretation	1 set out of 10 has specific information on BRG1448 (economic decision-making)

Use Cases

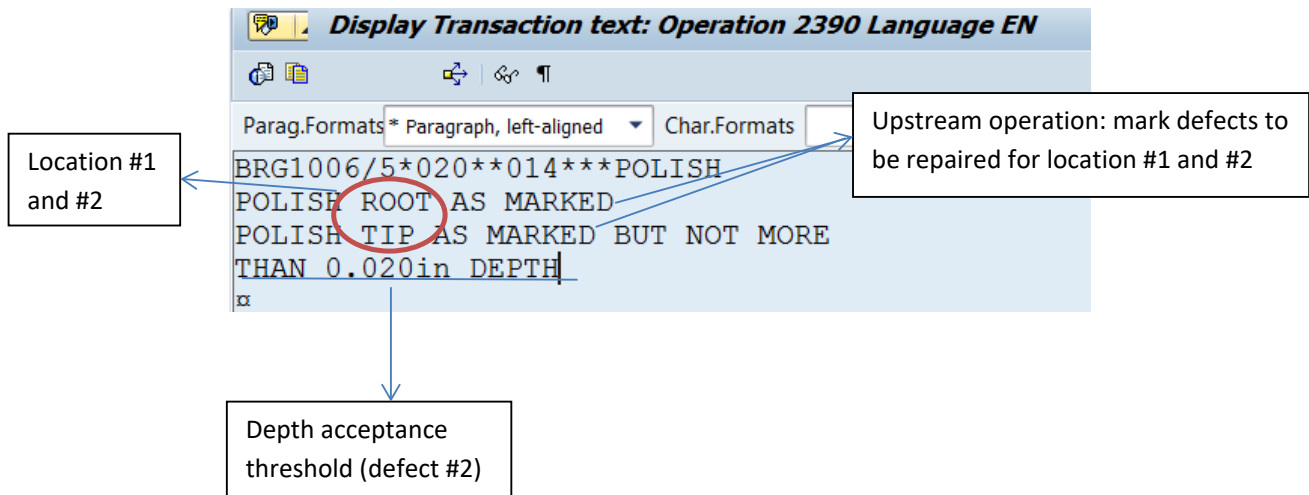
Use case 1: BRG1027



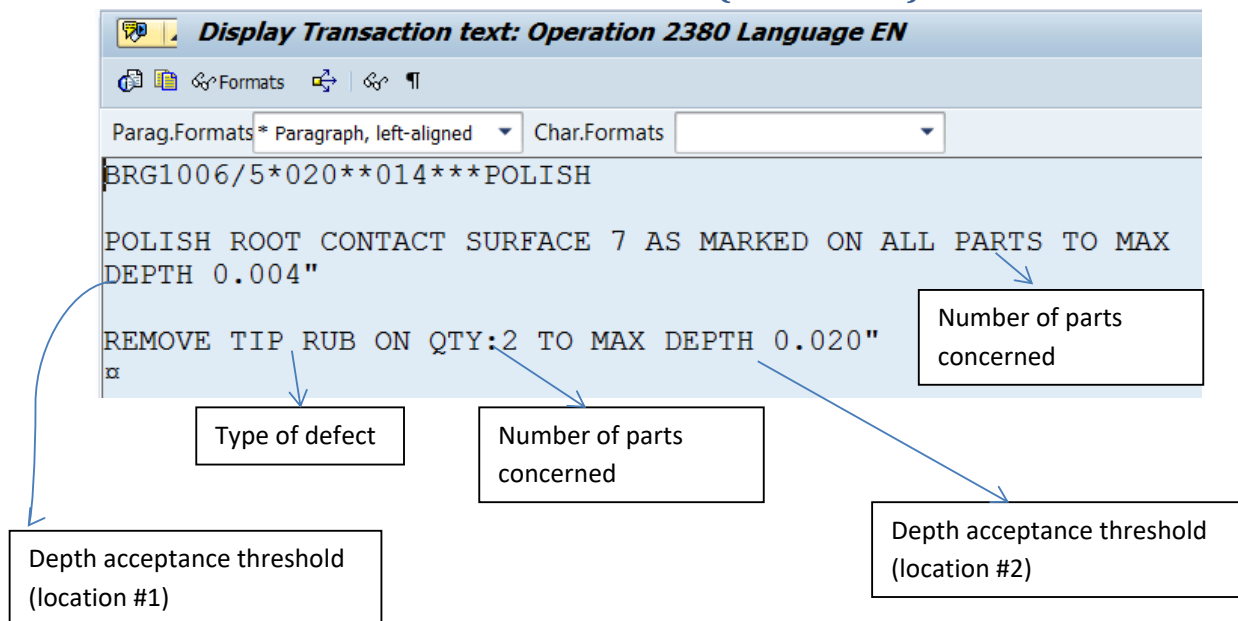
Use case 2: BRG1006



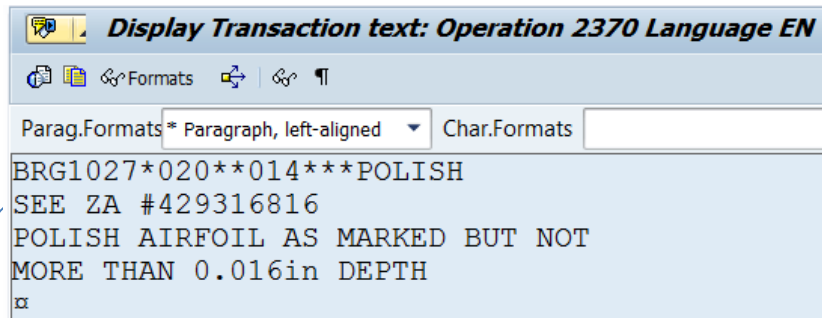
Use case 3: BRG1006 (2 locations)



Use case 4: BRG1006 (2 locations)

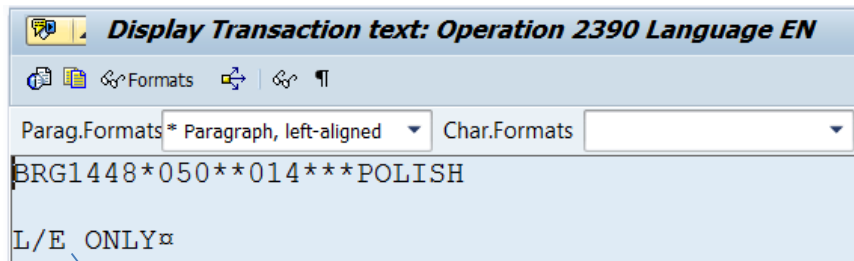


Use case 5: BRG1027



Additional document to check provided by MRB (here ZA = salvageable notification)

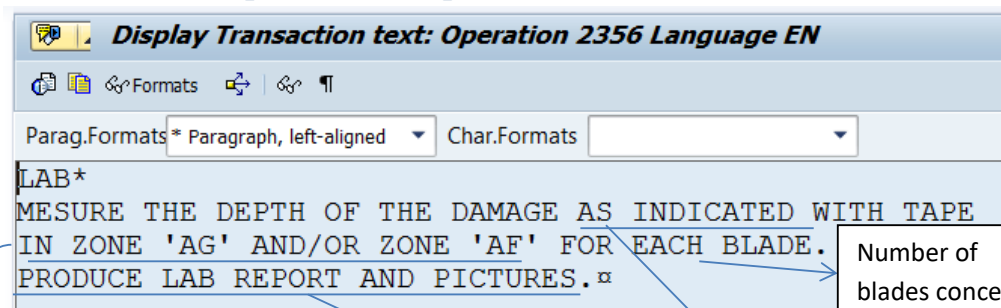
Use case 6: BRG1448



Location restriction

Upstream operation: ensure damages on T/E are acceptable or manually repaired

Use case 7: Output from inspectors to Lab



Locations of ambiguous damages

Inspectors' needs

Number of blades concerned

Upstream operation: ambiguous defects has been tapped

Use case 8: Inspectors to Lab

Display Transaction text: Operation 2364 Language EN

Parag.Formats * Paragraph, left-aligned Char.Formats

INSPECT
Identify the worst off nick/damage in the previously polished area(s) of Zone "AG" and/or Zone "AF".

The inspector had difficulty measuring a defect in the already polished area and therefore request a replica analysis

Use case 9: BRG1027 (full instructions)

Display Transaction text: Operation 2380 Language EN

Parag.Formats * Paragraph, left-aligned Char.Formats

BRG1027*020**014***POLISH
AS PER BRG1027 OP.030
NO DIMENSIONS SPECIFIED ABOUT MAX DEPTH LIMITS.
AS PER FIG.3 2 DRESSING PERMISSIBLE IN ZONE AF.
NO SPECIFICATION FOR ZONE AG.

AS PER SUBTASK 72-31-02-220-004 10.B OR 10.C NOTE:There is no limit for the number of dressings for each surface in zones AD, AE, AF and AG. But the dressing must be done only once in a damaged area and not opposite to each other on the concave and convex surfaces. No minimum distance is necessary between the dressing areas.

AS PER SUBTASK 72-31-02-220-004 10 B(3)& (4) ZONE AF - AG , IT IS PERMISSIBLE TO POLISH UP TO 0.012" IN DEPTH.

THE BLADES HAVE BEEN INSPECTED AND ARE WITHIN THE ABOVE SPECIFIED LIMITS. CONTINUE WITH BRG1027

α

Constraints

Constraints

Location + depth threshold

Estimation of depth + assessment confirmation

Use case 10: BRG 1006 (full instructions)

Display Transaction text: Operation 2380 Language EN

Parag.Formats * Paragraph, left-aligned Char.Formats

BRG1006/5*020**013***POLISH
 REMOVE GALLING ON BLADE ROOT CONTACT SURFACE 7 AS INDICATED.
 E/M LIMIT IS MAX. 0.004" DEPTH. ACTUAL DEPTH OF GALLING IS LESS
 THAN 0.004".
 ALSO REMOVE RUBBING AT TIP AS MARKED ON 2 FAN BLADES.
 E/M LIMIT IS MAX. 0.020" DEPTH. ACTUAL DEPTH OF RUBBING IS LESS
 THAN 0.020".

Number of blades concerned

Use case 11: BRG1027 (deviation from Standard Operating Procedures – Economic decision making)

Display Transaction text: Operation 2380 Language EN

Parag.Formats * Paragraph, left-aligned Char.Formats

BRG1027*020**014***POLISH
 polish area marked on airfoil not more than .012"
 tip crop T/L as marked.

Additional damage to remove using
 BRG 1027 (BRG1006 is usually the
 only repair scheme applied on Tip)

Normal defect to
 remove with BRG1027

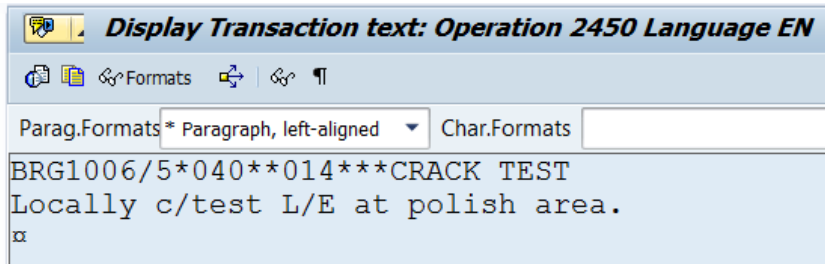
Use Case 12: post-repair inspection

Display Transaction text: Operation 3210 Language EN

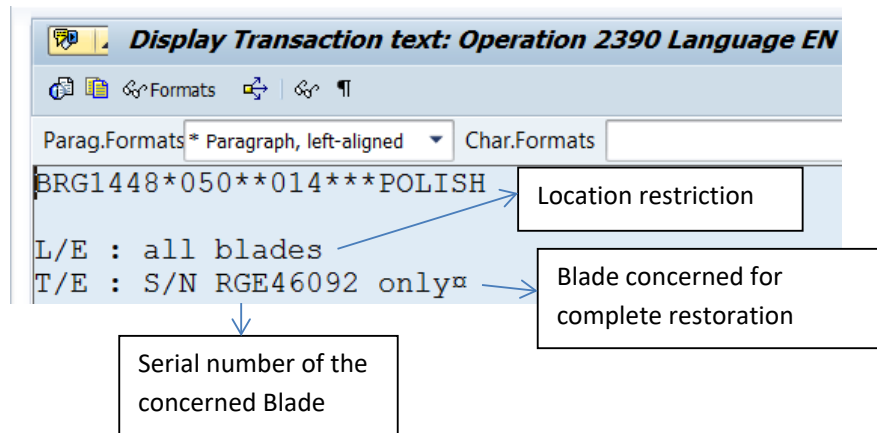
Parag.Formats * Paragraph, left-aligned Char.Formats

BRG1477*240**007***INSPECT
 Plasma remove and re-apply two time.
 Vibro engrave, BRG1477/2.

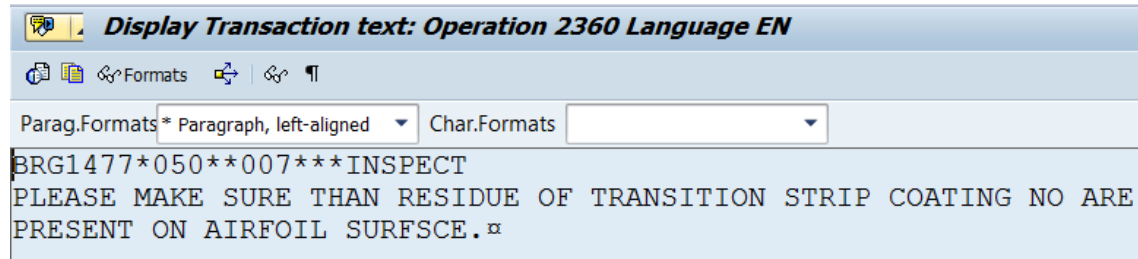
Use case 13: inspectors to crack test operators



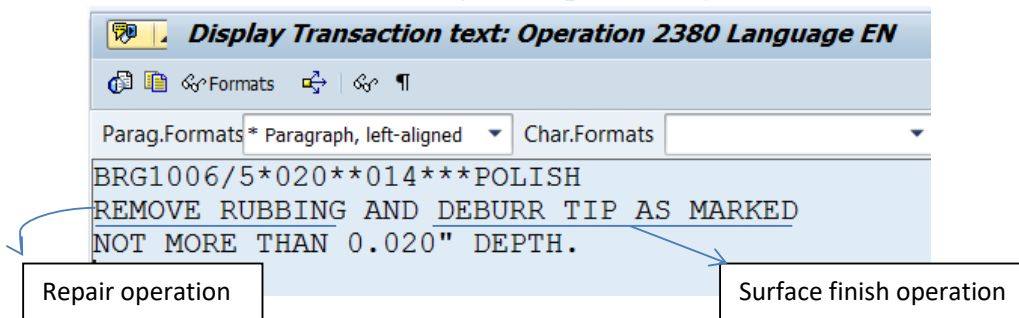
Use case 14: BRG1448



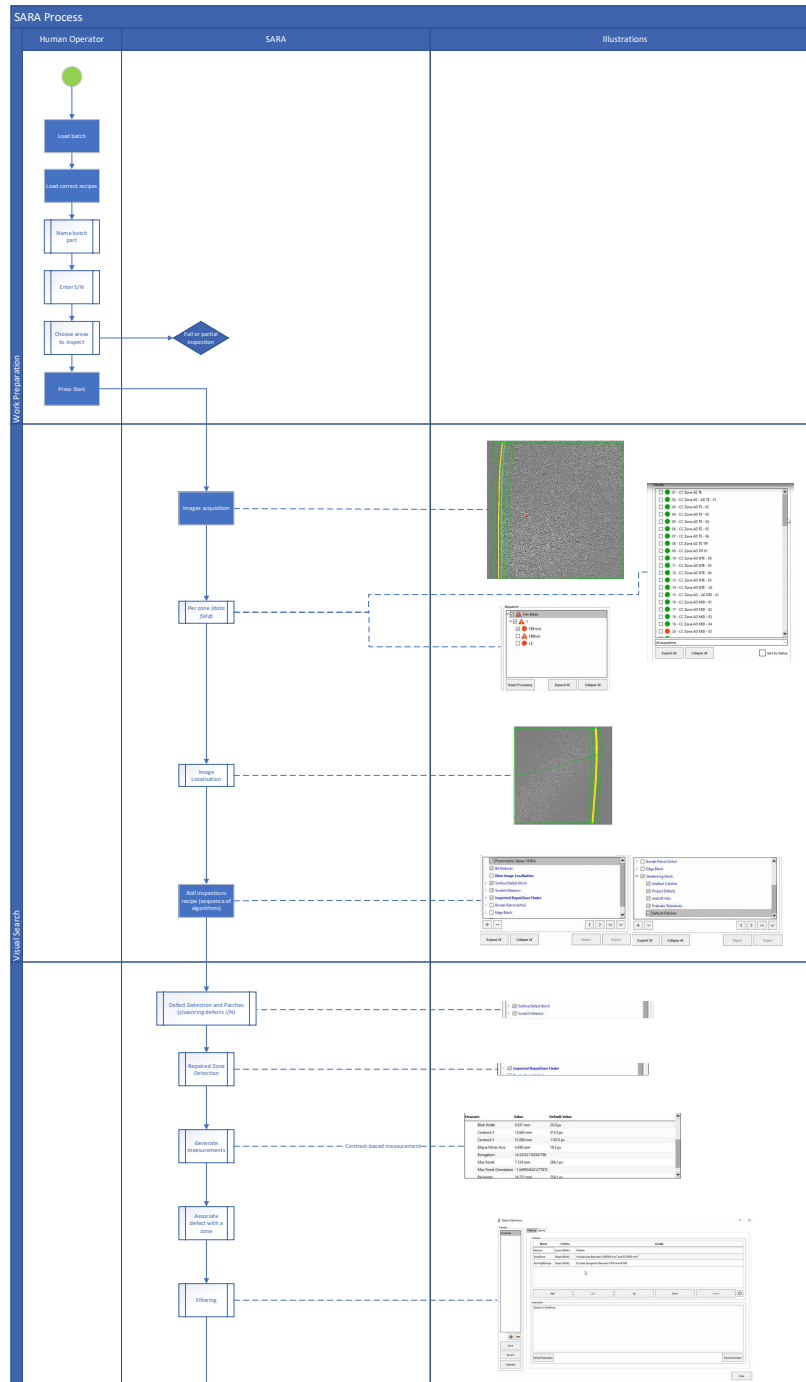
Use case 15: BRG1477 (issue with upstream process)

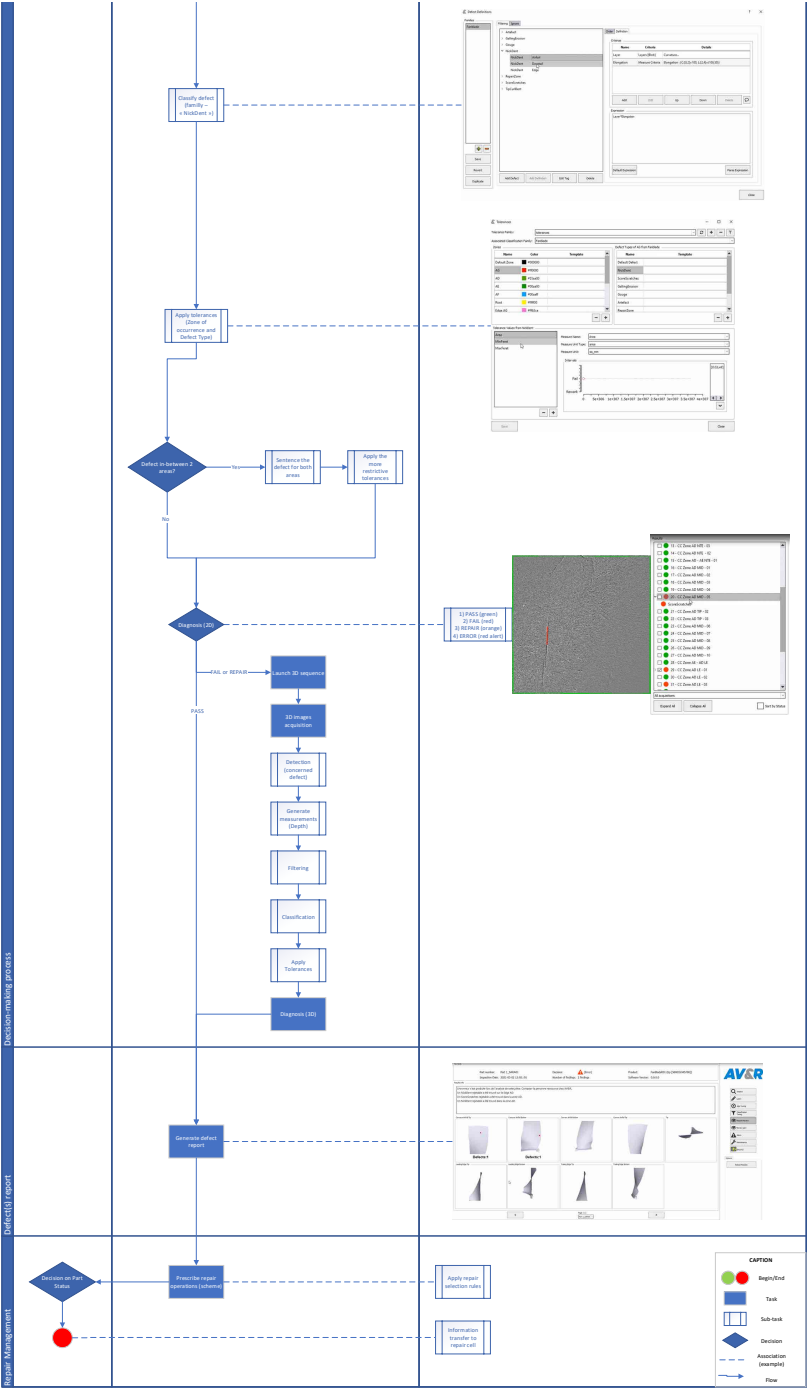


Use case 16: BRG1006 (dual operation)



ANNEXE D FLUX LOGICIEL DE SARA





ANNEXE E EXEMPLE DE RECOMMANDATIONS POUR L'INTERFACE UTILISATEUR : FENÊTRE *DEFECT VIEWER*

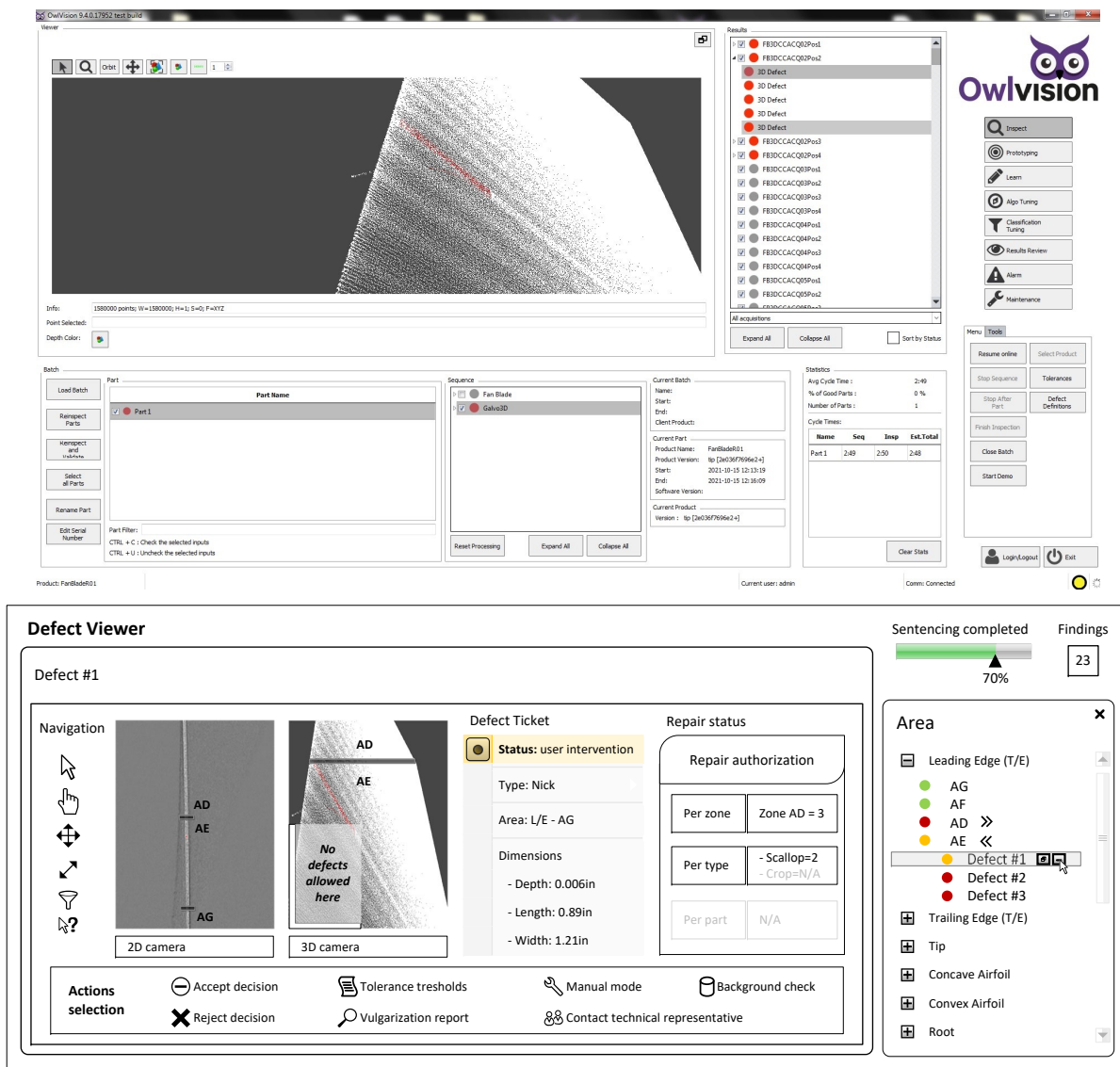


FIGURE E.1 Capture d'écran de l'interface utilisateur actuelle (haut) et recommandations d'amélioration sous forme de maquette basse-fidélité (bas). Cette recommandation propose en outre (1) d'afficher la zone d'apparition du défaut ; (2) de mettre en évidence les défauts *borderline* qui nécessite une confirmation supplémentaire de l'inspecteur (3) met en évidence les zones de la pièce où aucun défaut n'est autorisé dans les représentations 2D et 3D. De plus, l'affichage des zones du défaut en cours d'examen par SARA (sur la droite) suit le modèle mental des inspecteurs, et les contraintes de réparation de la pièce sont affichées (pas encore faisable avec les capacités technologiques, mais à explorer dans un projet futur).

ANNEXE F PROTOCOLE D'ÉVALUATION SOMMATIVE

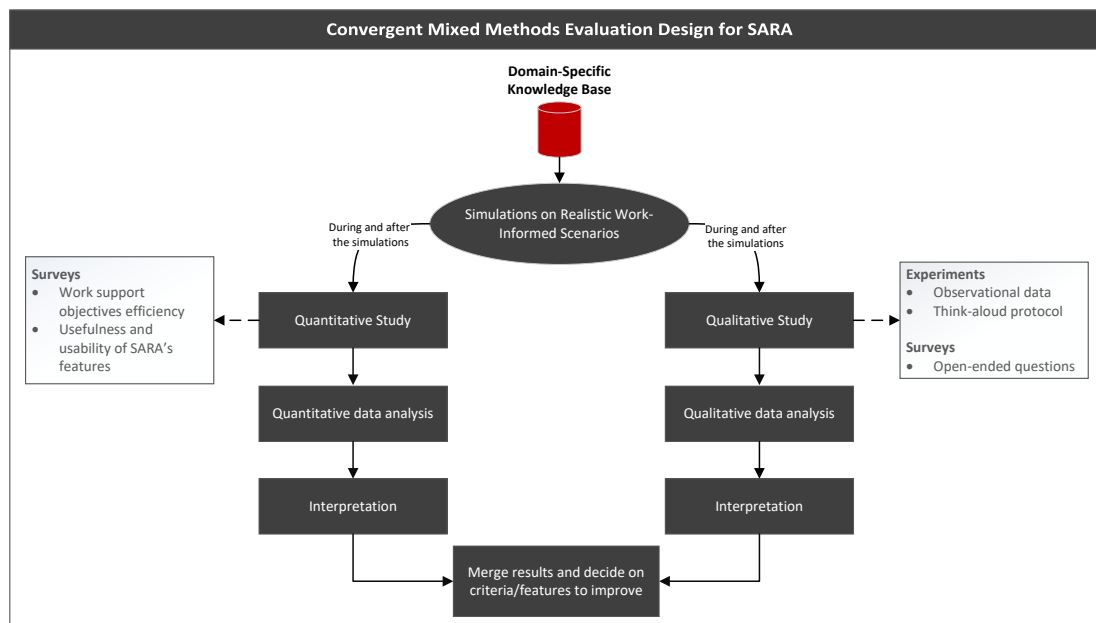


FIGURE F.1 Protocole d'évaluation sommative mixte sur la base scénarios opérationnels réalistes (Annexe G), d'une étude quantitative (questionnaires - Annexe H) et qualitative (données d'observations avec verbalisation à voix haute)

ANNEXE G SCÉNARIOS OPÉRATIONNELS RÉALISTES POUR LES ÉVALUATIONS DE SARA

Scénario 1 : inspection complète

1.1: Scan de la pièce au complet

Réalisez le sentencing de la pièce ou du lot de pièces au complet en utilisant SARA. Réalisez cette tâche comme si c'était une pièce de production, c'est-à-dire en tenant compte de la WIC, des TVs, TIs et toute autre documentation qui s'avèrent être nécessaires.

- Situations évaluées : (1) applications des TVs et TIs; (3) défaut présent dans une CFR ou s'étendant dans une zone interdite; (5) Défaut présent dans une CFR ou s'étendant dans une zone interdite; (6) Prescription des réparations suite au diagnostic
- Pré-requis : sélectionner une pièce qui a déjà reçu une shop visit précédemment (Fan Blades ou Shaft);

1.2 : Interprétation ordinateur de mesures

Vous voulez réaliser une vérification des mesures de profondeur, largeur et longueur d'un défaut. Procédez à la navigation logicielle pour vérifier l'output de SARA et le comparer avec les seuils de tolérances de l'engine manual. Validez ou invalidez les résultats.

1.3 : Interprétation ordinateur de mesures refusées par SARA (vulgarisation ou *results review*)

Le système indique la présence d'un défaut rejetable dans la zone X. Vous voulez vérifier que ce défaut est bel et bien rejetable. Réalisez les manipulations nécessaires pour vérifier que SARA a pris la bonne décision sur la base des analyses effectuées.

- Situation évaluée : (5) Interprétation de mesures refusées par SARA
- Fonctions spécifiques évaluées : utilité des commandes de contrôle pour manipuler les images 2D et 3D via l'interface et utilisation de la fenêtre mesures dimensionnelles

1.4 : Interprétation manuelle des mesures refusées par SARA

Vous enlevez la pièce du système pour réaliser une vérification manuelle du sentencing réalisé par SARA sur le défaut « X » rejeté dans la zone « Y ».

- Situation évaluée : (5) Interprétation de mesures refusées par SARA
- Fonction évaluée : localisation spatiale entre l'interface SARA et pièce physique

Scénario 2 : inspection de zones

Vous commencez par inspecter la pièce manuellement. Lors de cette inspection, vous détectez un défaut qui est selon vous, très proche des seuils de tolérances (limites). Vous décidez d'utiliser SARA pour inspecter seulement la (les) zone(s) où des défauts *borderline* se trouve pour obtenir leurs mesures dimensionnelles. Comparez les mesures obtenues avec les seuils de tolérances, et changez la décision du sentencing au besoin dans l'interface.

Fonctions spécifiques évaluées :

- Sélectionner la zone adéquate à scanner dans la fenêtre *Part Configuration* de SARA
- Relever les mesures dimensionnelles 2D et 3D prises par le système
- Comparaison des mesures prises par informatiques avec les seuils de tolérances
- Changez la décision du sentencing sur le défaut au besoin
- Changez la décision du sentencing sur la pièce au besoin

How Useful and Usable are the different system features?
(Please circle the best response)

Inspect

Part Configuration

1. The display offers the possibility to either fully scan each part or to select the areas you wish to scan with SARA (*Sequences* box in the *Part Configuration* window).

Is the function 'sequences' is presented in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	
									N/A Not experienced during session

Is the function useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	
									N/A Not experienced during session

Comments?

2. The display offers the possibility to select the specific zones you wish to scan with SARA (the right box next to the *Sequences* box).

Is this function is presented in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	
									N/A Not experienced during session

Is the function useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	
									N/A Not experienced during session

Comments?

3. Do you have any comments regarding the other elements of the *Part Configuration* window?



Inspect

Results Box (part inspected)

4. The display provides information about the different part's areas that SARA has scanned or will scan (*Results Box*). This information is intended to keep you aware of the current scanning state (hourglass and check mark) and to help you identify the defects' outcomes of each zones/areas processed (green or red dot).

Is the information shown in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Comments?

5. The display provides additional information for each zones/area where unacceptable defects were detected (red dot): types of defects, salient features on 2D images (e.g., red line or red area) and 3D points cloud. This information is intended to keep you aware in case a manual sentencing is required, and to support your final decision on the part's condition.

*Note that you can use the function *Sort by status* to gather unacceptable areas/zones by sequence.

Is the information shown in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Comments?

6. Do you have any comments regarding the other elements of the *Results* window?

--

Viewer (images acquisition box)

7. The display provides commands control (e.g., zoom in, zoom out, rotation, move in every direction) to help you navigate in the viewer window for the 2D and 3D images.

Are the commands easy to use?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Are the commands useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Comments?

--

8. The display shows the different images acquired by the 2D and 3D cameras to represent the scanned areas visually. The images may contain red marks (line or dot) to give you the exact location of the defect.

Is the information shown in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Comments?

--

Batch box

9. The display provides commands that give you the ability to execute actions on the parts inspected from the current batch. The commands enable you to load previous batch inspected (load batch), reinspect components and modify part's related information.

Are the commands displayed in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Are the commands useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

10. The right sidebar of the batch box provides identification information, performance metrics for the entire batch or for a single part,

Is the information shown in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

11. Do you have any comments regarding the Batch feature?

**Algo Tuning**

12. The window provides details on the images acquisition sequence and 2D/3D dimensional measures with the ability to search for a specific defect dimension. You can pull down the "Blob Shape" measurement tab to display specific measurements (Blob Height, Blob Width).

Is the information shown in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Not effective at all								Extremely effective	N/A Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Comments?

Validate Results (Tools Tab)

13. The display shows the different defects that have been rejected by SARA. This pane provides information of the rejected acquisitions, gives you numerical metrics about inspection performance (bottom page), and enable you to validate or refuse the decisions made.

Is the command/information displayed in an effective or usable (actionable) way?

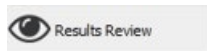
1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Is the command/information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Comments?

14. Do you have any additional comments regarding *Validate Results* tools and display?



Results Review

Part Info

15. The top banner provides identifying information, such as defects detected (findings and number of findings), decision outcomes, and other data relevant to this encounter. It summarizes the automated inspection conducted.

Is the information displayed in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Results Info (Defect Projection Tab)

16. The middle banner provides short form results of defects rejected. Defects rejected appear with red dot on 3D draws with different points of view (Concave Airfoil Tip view, Tip view etc...).

Is the information displayed in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Comments?

Results Info (Vulgarization Module)

17. This pane provides a short form result of completed sentencing. It gives you information about i) part's condition; ii) defects rejected; iii) class of defects; iv) area of occurrence; v) dimensional measure of the bigger defects (length, width, surface coverage using the metric system). It enables you to quickly visualize the sentencing performed by SARA.

Is the information displayed in an effective or usable (actionable) way?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Is the information useful to you?

1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Not effective at all								Extremely effective	Not experienced during session

Comments?