

Étude des facteurs contributifs à l'erreur humaine dans
l'assemblage manuel complexe: le cas d'une usine de
fabrication de moteurs d'avions

par

Yaniel TORRES MEDINA

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 4 OCTOBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Kurt Landau, codirecteur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mustapha Ouhimmou, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Ornwipa Thamsuwan, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Georges Abdul-Nour, examinateur externe
Département de génie industriel à l'Université du Québec à Trois Rivières

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 9 SEPTEMBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Cette thèse représente un point culminant dans mon cheminement académique. Après avoir suivi des études de deuxième cycle en ergonomie/génie de facteurs humains et en génie des risques de santé et sécurité du travail ainsi qu'avoir accumulé une importante expérience professionnelle de terrain, mon retour aux études doctorales règle une dette envers moi-même. Par ailleurs, ayant un baccalauréat en génie industriel, le projet de recherche qui m'a été offert, axé sur la manufacture aérospatiale, représentait également un retour à mes racines. C'est ainsi que mon projet de doctorat est devenu ma passion pendant ces dernières années de ma vie.

Le format de thèse par articles a été privilégié par rapport à une thèse sous forme de monographie dite « classique ». De cette manière, trois articles de revue scientifique avec comité de pairs font partie du corpus de la thèse. Ces articles font l'objet de trois chapitres distincts consacrés aux résultats du projet de recherche. L'introduction, le premier et deuxième chapitre ainsi que les conclusions générales et les recommandations ont été rédigés en français. Cependant, tous les articles de revue scientifique et les autres publications issues de cette thèse ont été rédigés en anglais (Annexe I). Malgré les défis posés par une thèse par articles et l'utilisation de deux langues, nous considérons que la diffusion de nos résultats de recherche au sein de la communauté autant scientifique que des praticiens est un aspect essentiel de la recherche appliquée. La thèse est structurée de manière à former un tout cohérent afin d'assurer la continuité des différents travaux de recherche.

À part les trois articles de revue avec comité de pairs, les résultats du projet de recherche associé à cette thèse ont fait l'objet de cinq articles de conférences internationales (deux affiches et trois présentations orales) et quatre articles de vulgarisation scientifique dont trois publiés tant en anglais qu'en français sur le site Substance ÉTS. Il y a eu également deux rapports de recherche confidentiels.

REMERCIEMENTS

La décision de poursuivre mes études au niveau de doctorat a été sans doute l'une de plus importante décision de ma vie jusqu'à présent. Bien que la réalisation d'un doctorat soit le fruit d'un travail individuel, qui demande de l'autonomie et même quelquefois de la solitude réflexive, ce travail a impliqué aussi de nombreuses personnes. Cette thèse est le résultat d'un projet de recherche qui s'est déroulé au sein du Laboratoire de génie des facteurs humains appliqués du département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure. Ce projet a été fait en étroite collaboration avec le milieu industriel par l'entremise de notre partenaire industriel.

Je tiens à remercier profondément ma directrice de recherche Sylvie Nadeau et mon codirecteur Kurt Landau pour m'avoir encadré tout au long de mon projet de doctorat. Je leur suis très reconnaissant pour le temps et les efforts qu'ils ont pu me consacrer depuis notre première rencontre. Vos suggestions et conseils m'ont beaucoup aidé dans le processus de maturation de ma pensée critique et de développement de mes compétences comme chercheur. Je tiens à remercier également le programme de bourse Mitacs Accélération, le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) et le partenaire industriel pour le soutien financier fourni. Je tiens finalement à remercier l'École de technologie supérieure pour le soutien financier et l'accès aux infrastructures de recherche.

Mes remerciements vont également aux travailleurs, aux superviseurs de ligne de production, et aux gestionnaires de qualité ou de production, qui ont également contribué avec leur participation à la réalisation du projet. C'est grâce à ces personnes, avec qui il a été agréable et fructueux de travailler, que j'ai pu mener à terme mes travaux de recherche tant sur le terrain que derrière l'écran de l'ordinateur.

« Nulla victoria sine sacrificio est »

ÉTUDE DES FACTEURS CONTRIBUTIFS À L'ERREUR HUMAINE DANS L'ASSEMBLAGE MANUEL COMPLEXE : LE CAS D'UNE USINE DE FABRICATION DE MOTEURS D'AVIONS

Yaniel TORRES MEDINA

RÉSUMÉ

L'étude de l'erreur humaine est devenu un sujet pertinent pour l'ergonomie/génie de facteurs humains (HF/E) et la sécurité industrielle depuis plusieurs décennies, particulièrement en lien avec des domaines dits critiques pour la sécurité (pétrochimique, nucléaire, aérospatial). Pour ce qui est du secteur de la manufacture, les aspects physiques du travail semblent avoir attiré la majorité de l'attention de la recherche en HF/E. Cependant, dans la manufacture aérospatiale les erreurs d'assemblage peuvent entraîner de pertes économiques importantes (problématique de qualité, productivité réduite) ou même compromettre la sécurité de l'aéronef. L'assemblage de moteurs d'avions, objet d'étude de cette thèse, est un travail qui se fait largement de manière manuelle et qui comporte des exigences cognitives importantes en raison de la complexité des tâches. Bien que certaines technologies liées à l'industrie 4.0 peuvent, à l'avenir, soutenir la performance humaine, il demeure toujours important d'étudier les conditions de réalisation de ce travail. La conception ou l'amélioration du système d'assemblage, avec ou sans soutien des technologies 4.0, doit tenir compte de facteurs qui exercent une influence sur la performance humaine afin de minimiser le risque d'erreurs.

Dans cette thèse nous visons à réaliser une étude de l'erreur humaine dans un centre de production de moteurs d'avions. On s'intéresse, en premier lieu, à identifier les principaux types d'erreurs possibles dans l'assemblage manuel complexe, évaluer le risque de celle-ci et l'influence de certains facteurs contributifs. Par la suite, on se focalise dans l'évaluation de la fatigue et la charge de travail pour terminer par l'illustration des influences organisationnelles sur les erreurs d'assemblage chez les travailleurs. De cette manière notre étude se concentre non seulement sur le travailleur et son environnement immédiat, mais aussi sur le système de production dans son ensemble. L'étude a été réalisée en collaboration avec un partenaire industriel et comporte un volet terrain important. La méthodologie utilisée comme cadre de référence dans cette thèse répond à une méthodologie de type mixte ce qui explique le choix de méthodes et techniques très variées : empiriques qualitatives, empiriques quantitatives et analytiques. Nous avons suivi une approche de type *bottom-up* en commençant par l'analyse du travail des assembleurs et leur environnement de travail pour ensuite étendre l'analyse à des éléments du système organisationnel.

Nos résultats montrent que certaines tâches sont particulièrement vulnérables aux erreurs comme c'est le cas de l'installation des supports de fixation (*bracket*), l'installation des colliers de serrage coussinés (*cushioned loop clamp*) et l'installation de capuchons d'entrée (*caps-covers*). Selon l'analyse statistique des registres de qualité, ces trois tâches étaient responsables de deux tiers des problèmes de qualité au cours de la période de 36 mois choisie. L'analyse de la fiabilité humaine semble indiquer que la géométrie de certaines pièces d'assemblage

(support de fixation et colliers de serrage coussinés) accompagnée d'une conception et d'affichage des instructions de travail sous-optimales (dessins 2D statiques, incohérences dans l'ordre des étapes présentées dans les dessins, dimensions réduites de l'écran, écran éloigné de la position d'assemblage), peut avoir un impact négatif sur la performance des assembleurs (augmentation du risque d'erreur). Dans d'autres cas, le manque de rétroaction immédiate du système ou de moyens évidents afin de suivre l'évolution de la tâche, peut nuire également à la performance. Ceci est le résultat du nombre et de la variété élevée de pièces d'assemblage ce qui rend difficile de garder la trace tout au long de l'activité de travail. À cela s'ajoutent les distractions et les interruptions qui représentent également des facteurs d'influence sur la probabilité d'erreur dans le contexte étudié. Certaines interruptions plus longues sont liées à la discontinuité des tâches par manque de pièces (problèmes avec les fournisseurs) tandis que d'autres, plus courtes, sont liées aux va et vient entre le banc de travail (ordinateurs, bacs de pièces) et la position d'assemblage. D'un autre côté, l'analyse des résultats de l'étude de la fatigue et la charge de travail réalisée auprès de 14 travailleurs pendant une période de deux semaines montre que la perception de la charge de travail globale, le fait de travailler le quart de soir et la fatigue ressentie au début de la journée de travail sont des prédicteurs des niveaux de fatigue potentiellement nuisibles à la performance (niveau de fatigue ≥ 5 dans l'échelle Samn Perelli). Les participants ont déclaré également avoir dormi moins de sept heures pendant 60 % des nuits évaluées. De plus, les travailleurs perçoivent la composante cognitive de la charge de travail comme la plus importante parmi les six composantes évaluées. Ce qui semble être le résultat de la nature complexe de l'assemblage aéronautique.

Finalement, les méthodes d'analyse systémique nous ont fourni une vision holistique du système de production à la lumière de l'erreur humaine et l'assemblage manuel complexe. Nous avons identifié, par exemple, que l'instabilité dans l'approvisionnement de pièces provoque une discontinuité du flux de production qui à son tour génère des périodes de faible et de forte production. Alors qu'une forte production entraîne le recours à des heures supplémentaires et à des horaires de travail atypique, une faible production peut mener à plus de distractions et d'interruptions. En plus, la politique de rémunération des heures supplémentaires convenue par la négociation collective peut inciter les travailleurs à accumuler un nombre important d'heures de travail qui dépasse la limite généralement établie de 40h par semaine. De manière semblable, la stratégie technologique de l'entreprise en liaison avec des aspects budgétaires a une influence sur le système informatique de soutien à la manufacture présentement en place. La conception des instructions de travail qui ne tient pas en compte les besoins de l'utilisateur final est un autre exemple des facteurs organisationnels qui exercent une influence sur la performance des travailleurs de ligne d'assemblage. On peut ainsi constater que les erreurs d'assemblage sont aussi associées à des facteurs du niveau macro du système de travail.

En conclusion, nos résultats suggèrent que différents facteurs liés à la conception et à la gestion du système d'assemblage ont un impact potentiel sur la performance des travailleurs. Ces facteurs peuvent augmenter le risque d'erreurs d'assemblage. Une attention particulière doit être accordée à la charge de travail cognitive à cause de l'impact potentiel sur la fatigue dans le contexte de l'assemblage complexe. Cela devrait se traduire par une stratégie d'intervention qui tient compte de l'interaction entre les travailleurs et les instructions de travail (contenu,

mode d'affichage, réalisme des images) et des moyens pour assurer une rétroaction immédiate et le suivi de l'évolution de la tâche. Dans ce sens, l'adoption et l'intégration de certaines technologies de soutien de l'humain dans un contexte d'industrie numérique représentent une piste de solution à explorer (système de guidage de l'assemblage). Il est à noter qu'une surcharge des heures de travail, accompagnée des horaires de travail atypique, pourraient contribuer également à la fatigue et à une possible détérioration de la performance. De telles pratiques de gestion du temps de travail devraient être évitées ou minimisées (ex. en assurant des niveaux de production stables) à défaut du quoi un guide clair sur certaines limites serait nécessaire. La sensibilisation de travailleurs au sujet de l'hygiène du sommeil est aussi importante. Il est à noter que dans tous les cas, les solutions doivent être axées sur une perspective de système, c'est-à-dire prendre en compte les facteurs d'influence à plusieurs niveaux dans la structure organisationnelle. Des technologies 4.0 comme la réalité augmentée offrent un potentiel intéressant, d'autres solutions de type "classique" sont également importantes. Dans les deux cas, l'analyse avec l'approche systémique constitue un élément essentiel afin de réussir le processus de mise en place de solutions pour augmenter la performance et diminuer le risque d'erreurs.

Mots clés : erreur d'assemblage, problèmes de qualité, complexité, charge de travail, charge cognitive, fatigue

STUDY OF THE FACTORS CONTRIBUTING TO HUMAN ERROR IN COMPLEX MANUAL ASSEMBLY: THE CASE OF AN AIRCRAFT ENGINE MANUFACTURING PLANT

Yaniel TORRES MEDINA

ABSTRACT

The study of human error has been considered a relevant topic for ergonomics and industrial safety discipline during the past several decades, particularly in connection with so-called safety-critical domains (petrochemical, nuclear, aerospace). In the manufacturing sector, the physical aspects of work seem to have attracted most of the attention of ergonomics research. However, in aerospace manufacturing, assembly errors can lead to significant economic losses (quality problems, reduced productivity) or even compromise the safety of the aircraft. The assembly of aircraft engines, the object of study in this thesis, is a job primarily done manually and involves significant cognitive requirements due to the complexity of the tasks performed. While some Industry 4.0 technologies may, in the future, support human performance in complex manual assembly, it is still vital to study the conditions under which this job is performed. Furthermore, the design or improvement of the assembly system, with or without the support of modern technologies, must consider factors that influence human performance to minimize the risk of errors.

In this thesis, we aim to study human error in aircraft engine production. We are interested in identifying the main types of errors that can occur during complex manual assembly, evaluate their risk and the influence of several contributing factors. We also focus on the evaluation of fatigue and workload and finally we illustrate the organizational influences on the assembly errors. In this way, our study focuses not only on workers and their immediate environment but also on the production system as a whole. The study was carried out in collaboration with an industrial partner and included a significant field component. The methodology used as a framework of reference in this thesis is a mixed-method, which explains the choice of a wide variety of methods and techniques: qualitative empirical, quantitative empirical and analytical. We followed a bottom-up approach, starting with the analysis of the assemblers' work and their work environment and extending the analysis to elements of the organizational system.

Our results show that some tasks are particularly vulnerable to errors, such as bracket installation, cushioned loop clamp installation, and caps-cover installation. Statistical analysis of the quality records indicated that these three tasks accounted for two thirds of the quality problems during the 36-month period selected. The human reliability analysis suggests that the geometry of some assembly parts (brackets and cushioned loop clamps) accompanied by suboptimal design and display of work instructions (static 2D drawings, inconsistencies in the order of steps presented in the drawings, small screen size, screen away from the assembly position), can have a negative impact on assembler performance (increased risk of error). In other cases, the lack of immediate feedback from the system or obvious means to monitor the progress of the task can also affect performance. This is a result of the high number and variety of assembly parts that make it difficult to keep track of the entire work activity. In addition,

distractions and interruptions are also factors that influence the probability of error in the context studied. Some of the more prolonged interruptions are related to the discontinuity of tasks due to lack of parts (problems with suppliers), while others are related to the back and forth between the work bench (PC monitor, parts bins) and the assembly position.

On the other hand, the analysis of the results of the study of fatigue and workload shows that perception of the overall workload, working the evening shift, and fatigue felt at the beginning of the shift are predictors of potentially harmful levels of fatigue to performance (fatigue level ≥ 5 on the Samn Perelli scale). Participants also reported getting less than seven hours of sleep on 60% of the nights assessed. In addition, workers perceived the cognitive component of workload as the most important of the six components of workload assessed. This appears to be a result of the complex nature of aircraft assembly. Finally, systems-oriented analysis methods provided a holistic view of human error within the assembly system. We identified, for example, that instability in the supply of assembly parts causes discontinuity in the production flow, which in turn generates periods of low and high production. While high production leads to overtime and atypical working hours, low production can lead to more distractions and interruptions. In addition, the policy of overtime payment agreed upon through collective bargaining may induce workers to accumulate a significant number of hours of work that may exceed the generally established limit of 40 hours per week. Similarly, in conjunction with budgetary aspects, the company's technological strategy influences the computerized manufacturing support system currently in place. The design of work instructions that do not consider the needs of end users is another example of organizational factors that influence the performance of assembly workers. Thus, we can see that assembly errors are also associated with macro-level factors of the work system.

In conclusion, our results suggest that different factors related to the design and management of the assembly system have a potential impact on workers' performance. These factors may increase the risk of assembly errors. Particular attention should be paid to cognitive workload because of its possible effects on fatigue in complex assembly. This should result in an intervention strategy that considers the interaction between workers and work instructions (content, display mode, realism of images) and the means to ensure immediate feedback and monitoring of task progress. In this sense, the adoption and integration of certain human support technologies in a digital industry context represent a solution to explore (assembly guidance system). It should be noted that an overload of work hours accompanied by atypical work schedules could also contribute to fatigue and a possible deterioration of performance. Such working time management practices should be avoided or minimized (e.g., by ensuring stable production levels). Otherwise, clear guidance on certain limits would be necessary. Worker awareness of sleep hygiene is also essential. In all cases, solutions must be focused on a systems perspective, i.e., take into account influencing factors at multiple levels in the organizational structure. Although some 4.0 technologies such as augmented reality offer an interesting potential, other "classic" solutions are also important. In both cases, the analysis with the systemic approach is an essential element to successfully implement solutions to increase performance and decrease the risk of errors.

Keywords: assembly error, quality problems, complexity, workload, cognitive load, fatigue

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
1.1 L'erreur humaine	7
1.1.1 Définitions et cadre théorique	7
1.1.2 L'analyse de l'erreur humaine	14
1.1.3 L'erreur humaine dans l'assemblage manuel	18
1.1.4 Facteurs contributifs à l'erreur humaine	22
1.2 La charge de travail et la fatigue.....	26
1.2.1 Définition de charge de travail.....	26
1.2.2 Charge de travail mental	28
1.2.3 Définition de la fatigue	30
1.2.4 Fatigue et performance	31
1.2.5 Mesures de la fatigue	33
1.3 Approche systémique.....	34
1.3.1 Origine et évolution	34
1.3.2 L'approche systémique en sécurité et ergonomie.....	35
1.3.3 Méthodes d'analyse systémique	38
1.4 Technologie numérique dans la manufacture	39
1.4.1 La conceptualisation de l'Opérateur 4.0	40
1.4.2 La réalité augmentée	42
1.4.3 La robotique collaborative	45
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE.....	47
2.1 Problématique de recherche et objectifs	47
2.1.1 Objectif général.....	48
2.1.2 Objectifs spécifiques.....	48
2.2 Fondements et choix de la méthodologie de la thèse.....	49
2.2.1 Des phénomènes complexes en situation réelle: l'étude de cas.....	51
2.2.2 L'orientation pratique de la recherche	52
2.3 La démarche de recherche et ces étapes	53
2.4 La recherche avec sujets humains: implications éthiques.....	55
2.5 Les méthodes de collecte et d'analyse de données	56
CHAPITRE 3 ARTICLE 1: CLASSIFICATION AND QUANTIFICATION OF HUMAN ERROR IN MANUFACTURING: A CASE STUDY IN COMPLEX MANUAL ASSEMBLY.....	61
3.1 Introduction.....	62
3.2 Literature Review.....	65
3.2.1 Some considerations about manual assembly.....	65

3.2.2	Human reliability analysis: origins and applications in assembly systems.....	68
8		
3.3	Material and Methods	70
3.4	Results.....	76
3.4.1	Selection and description of critical tasks.....	76
3.4.2	Identification and description of error modes.....	80
3.4.3	Human error probabilities calculation	84
3.5	Discussion.....	87
3.5.1	Limits of the study	90
3.6	Conclusion	91
CHAPITRE 4	ARTICLE 2: EVALUATION OF FATIGUE AND WORKLOAD AMONG WORKERS CONDUCTING COMPLEX MANUAL ASSEMBLY IN MANUFACTURING.....	93
4.1	Introduction.....	94
4.2	Methods.....	97
4.2.1	Participants.....	97
4.2.2	Procedure	98
4.2.3	Evaluation of fatigue.....	99
4.2.4	Evaluation of workload.....	100
4.2.5	Statistical analysis.....	101
4.3	Results.....	102
4.4	Discussion.....	107
4.4.1	Fatigue scores.....	107
4.4.2	Predictors of fatigue.....	108
4.4.3	Fatigue and sleep.....	111
4.4.4	Limitations of the study and future research.....	112
4.5	Conclusion	114
CHAPITRE 5	ARTICLE 3: APPLYING ACCIMAP AND STAMP TO THE ANALYSIS OF HUMAN ERROR IN COMPLEX MANUAL ASSEMBLY	117
5.1	Introduction.....	118
5.2	Literature Review.....	120
5.2.1	Description of AcciMap.....	126
5.2.2	Description of STAMP	128
5.3	Method	130
5.3.1	General approach	130
5.3.2	Case synopsis	134
5.3.3	Selection of systemic methods.....	136
5.3.4	Validity and reliability	137
5.4	Results.....	139
5.4.1	AcciMap result.....	139

5.4.2	STAMP result	141
5.5	Discussion	146
5.5.1	Limitations and future directions	153
5.6	Conclusion	154
CONCLUSION.....		157
RECOMMANDATIONS		159
ANNEXE I	LISTE DES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE.....	161
ANNEXE II	CERTIFICAT D'ÉTHIQUE SOUS-PROJET NO.1.....	165
ANNEXE III	CERTIFICAT D'ÉTHIQUE SOUS-PROJET NO.2.....	167
APPENDICE A	DOCUMENTS : COLLECTE DE DONNÉES.....	169
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		173

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Quelques définitions de l'erreur humaine dans la littérature.....8
Tableau 1.2	Résumé de deux approches pour aborder la problématique de l'erreur humaine.....13
Tableau 1.3	Quelques exemples de techniques selon le niveau dans la démarche d'étude de l'erreur humaine.....16
Tableau 2.1	Répertoire des méthodes utilisées dans la recherche présentée dans cette thèse.....57
Tableau 3.1	Some developments and applications of HRA to manual assembly in manufacturing.....71
Tableau 3.2	SHERPA output-human error analysis table for critical task install brackets.....82
Tableau 3.3	Consolidated results of error modes obtained with SHERPA for the three tasks under study.....83
Tableau 3.4	HEART calculation of the HEP for brackets.....85
Tableau 3.5	Consolidated results of HEP calculations and Error Producing Conditions with their respective % contribution.....86
Tableau 4.1	Distribution of participants by week and shift.....98
Tableau 4.2	Fatigue classes and Predicted Effect of Fatigue on Performance.....100
Tableau 4.3	Results from inferential statistics analysis using t-tests.....103
Tableau 4.4	Results from binary logistic regression for the major variables under study.....104
Tableau 4.5	Results from binary logistic regression for the six dimensions of NASA TLX.....107
Tableau 5.1	Difference between accidents in safety-critical domains and error-related quality deficiencies in manufacturing.....125

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Taxonomie GEMS de l'erreur humaine.....10
Figure 1.2	Cadre pour la compréhension de l'erreur humaine.....12
Figure 1.3	Cadre conceptuel pour examiner la relation entre la fatigue et la sécurité.....33
Figure 2.1	Démarche méthodologique de la thèse.....54
Figure 2.2	Les trois principaux sous-projets de la thèse.....54
Figure 2.3	Principales méthodes utilisées en fonction de leur nature et du sous-projet correspondant.....57
Figure 3.1	Utilization areas for manual, hybrid and automated assembly concepts.....62
Figure 3.2	Human error analysis process used in the study.....73
Figure 3.3	Workstation's layout (not to scale) and general workflow.....76
Figure 3.4	Parts used in the assembly tasks.....78
Figure 3.5	2D drawing presented on work instruction related to the installation of brackets A, B and C.....78
Figure 3.6	Bracket A secured to the structure in the final assembly location.....79
Figure 3.7	Installation of data cable and cap covers in their respective assembly locations.....79
Figure 3.8	HTA diagram for the breakdown critical task install brackets.....80
Figure 4.1	Breakdown of reported sleep duration.....102
Figure 4.2	Distributions of reported fatigue scores before (A) and after (B) a work shift.....104
Figure 4.3	Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX as evaluated by workers.....105
Figure 4.4	Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX stratified by shift.....106

Figure 4.5	Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX stratified by week.....	106
Figure 5.1	Proposed legend to standardize AcciMap symbols.....	127
Figure 5.2	General form of a model of socio-technical system control structure....	129
Figure 5.3	Classification of control flaws leading to hazards.....	130
Figure 5.4	Logic approach used to construct the case synopsis and apply systemic methods.....	133
Figure 5.5	AcciMap analysis of the quality deficiency incident: “failure to properly install bracket”.....	141
Figure 5.6	Socio-technical system control structure of the assembly process.....	143
Figure 5.7	Control loop of the assembly process.....	144
Figure 5.8	Flaws in the control loop of the assembly process based on the STAMP classification.....	146

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

SHERPA	Systematic Human Error Reduction and Prevention Analysis
HRA	Human Reliability Analysis
HEI	Human Error Identification
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
HTA	Hierarchical Task Analysis
HFACS	Human Factors Analysis and Classification System
STAMP	Systems Theoretic Accident Model and Process
FRAM	Functional Resonance Accident Model
ICAO	International Civil Aviation Organization
FAA	Federal Aviation Administration
SRK	Skill, Rule, Knowledge
GEMS	Generic Error-Modelling System
HEIST	Human Error Investigation Software Tool
HFMEA	Human Failure Mode and Effects Analysis
TRACEr	Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors
THERP	Technique for Human Error-Rate Prediction
HEART	Human Error Assessment and Reduction Technique
ATHEANA	A Technique for Human Event Analysis)
CREAM	Cognitive Reliability and Error Analysis Method)
DFA	Design for Assembly
PRA	Probabilistic Risk Assessment

IAEA	International Atomic Energy Agency
HEP	Human Error Probability
HSE	Health and Safety Executive
EPC	Error Producing Condition
PSF	Performance Shaping Factor
QFD	Quality Function Deployment
MPAL	Mixed Product Assembly Line
NASA	National Aeronautics and Space Administration
EEG	Electroencephalogram
ISO	International Organization for Standardization

INTRODUCTION

L'industrie aérospatiale est confrontée à la recherche constante de pistes d'améliorations de la performance du système à cause, entre autres, de la gravité potentielle de défaillances liées aux aéronefs en termes de vies et de coûts. En règle générale, le pourcentage d'accidents aériens lié à l'erreur humaine peut varier grandement d'une source à l'autre (40%-80%) dépendamment des bases d'analyse ainsi que de la phase ou l'étape de la chaîne de valeur étudiée (Oster et al., 2010; Rankin, 2007). Il n'en reste pas moins que les facteurs humains sont impliqués dans la plupart des événements aéronautiques (ICAO, 1993). En fait, il a été constaté qu'à mesure que les aéronefs sont devenus techniquement plus fiables, les humains jouent un rôle causal plus important dans les accidents d'aviation (Wiegmann et Shappell, 2001). La phase d'opération (Nagel, 1988; Shappell et Wiegmann, 2017) et la phase de maintenance (Dhillon, 2007; Latorella et Prabhu, 2000; Rashid, 2010) semblent être les plus étudiées dans la littérature spécialisée sur l'erreur humaine ce qui contraste avec la phase de production de l'aéronef. Cela peut s'expliquer par le fait qu'historiquement, dans le domaine de la manufacture, les exigences physiques du travail ont reçu la plupart de l'attention (Bruder et al., 2009) en raison de la prévalence des troubles musculosquelettiques (Bao, 2015; Yang et al., 2020) associés à un niveau d'activité physique relativement élevé. Par conséquent, de manière globale, les améliorations de l'ergonomie dans les procédés de fabrication se sont souvent concentrées sur la réduction des charges biomécaniques tandis que les erreurs humaines, plus liées aux aspects cognitifs et organisationnels du travail, ont été relativement moins étudiées.

Nonobstant, dans certains domaines manufacturiers, la nature complexe de l'assemblage fait en sorte que l'erreur humaine est un sujet pertinent pour la recherche. C'est le cas de la manufacture automobile et de la manufacture aérospatiale où les erreurs d'assemblage peuvent générer des problématiques de qualité telles que des connexions desserrées, un composant manquant, des dommages à une pièce ou l'installation d'une mauvaise pièce, entre autres (Falck et Rosenqvist, 2014; Gates, 2019; Richards, 2018). Ces problématiques de qualité engendrent, à leur tour, des pertes économiques importantes en termes de coût de non-qualité et de productivité réduite (Falck et al., 2010). De plus, dans certains cas, les problèmes de

qualité pourraient également compromettre la sécurité du produit. Par exemple, en 2019, Boeing a dû clouer au sol ses ravitailleurs KC-46 (version modifiée du KC-767) lorsque l'armée de l'air américaine a trouvé des débris provenant de corps étrangers (*Foreign Object Debris*) à l'intérieur des fuselages des avions déjà assemblés et en exploitation (Gates, 2019). Ce qui représentait un risque important pour la sécurité de l'opération de ces aéronefs.

Dans la littérature, l'origine des erreurs humaines est souvent associée à l'ergonomie du poste de travail dont certains éléments tels que l'environnement de travail (éclairage, bruit, confort thermique), la charge de travail, le rythme de travail, le contenu complexe du travail ou des instructions peu claires, entre autres (Eklund, 1999; Erdinç et Yeow, 2011; Kolus et al., 2018). De ce fait, la conception du poste de travail doit tenir compte des facteurs dits ergonomiques afin d'améliorer la santé et le bien-être des travailleurs, réduire le risque d'erreurs et les pertes économiques associées. Bien qu'il existe une tendance croissante à l'automatisation dans la manufacture (Dinlersoz & Wolf, 2018), la nature complexe de l'assemblage aérospatial (Amir et Weiss, 2019) fait en sorte que le recours aux compétences et à la dextérité humaine est encore nécessaire. Il est important, alors, d'identifier et de comprendre les facteurs de nature ergonomique qui peuvent exercer une influence sur la performance des travailleurs exécutant des tâches d'assemblage complexe, comme c'est le cas de l'industrie aéronautique. Cela permettrait de développer des stratégies adéquates afin de prévenir l'erreur et les problématiques de qualité/sécurité associées.

Une stratégie efficace utilisée dans le domaine de la manufacture pour prévenir les erreurs d'assemblage consiste à réduire la complexité du produit pendant la phase de conception. Ceci est généralement réalisé en utilisant la méthodologie *Design for Assembly* (DFA), une méthodologie d'ingénierie axée sur la réduction des coûts et qui cherche à minimiser le nombre de pièces et le nombre d'opérations d'assemblage nécessaires (Boothroyd, 1994). La méthodologie DFA peut conduire à une meilleure qualité en réduisant le nombre « d'opportunités d'échec » dans toute opération d'assemblage (Kent, 2016). De manière similaire, l'utilisation des principes de prévention des erreurs, connu en anglais comme « *mistake proofing* » ou son équivalent japonais « *poka-yoke* », est une stratégie bien établie

pour réduire les erreurs d'assemblage (Blais, 2011). Cependant, la réduction de la complexité de l'assemblage lors de l'étape de conception des produits manufacturiers n'est pas le seul paramètre à optimiser. Dans des domaines comme la manufacture aéronautique (cas traité dans notre recherche), la fiabilité et la maintenabilité sont aussi des éléments essentiels à optimiser dès la conception (Dhillon, 1999). De manière semblable, dans la manufacture aéronautique, une fois le produit testé et certifié, celui-ci conserve la plupart de sa structure de conception initiale pendant plusieurs décennies (P&WC, 2020). Ce qui implique que des changements importants de la structure du produit sont difficilement envisageables. Par conséquent, pour être durable, les stratégies de prévention de l'erreur humaine dans d'assemblage complexe doivent s'étendre au-delà de la phase de conception du produit. Des éléments liés à la conception des postes de travail et du système de travail doivent être pris en compte.

Le recours à plusieurs technologies numériques représente une voie à explorer pour la prévention de l'erreur humaine et l'augmentation de la performance des travailleurs plus globalement. En général, ces technologies ne cherchent pas la substitution de l'humain par la machine, mais plutôt à offrir du soutien à la performance des travailleurs. Ce soutien est offert tant du point de vue cognitif comme du point de vue physique (Romero et al., 2016). De plus, il a été constaté que l'utilité et la pertinence de ces technologies, dites de « support humain », doivent être évaluées à la lumière des caractéristiques du lieu de travail, mais aussi du système de production (Nadeau et Landau, 2018). Nonobstant, toute stratégie visant à augmenter la performance humaine et à réduire le risque d'erreurs d'assemblage doit se baser sur une compréhension holistique du contexte de travail. Nous devons dépasser ainsi, la focalisation sur les erreurs individuelles et l'environnement immédiat du travailleur afin de comprendre et optimiser le système de production dans sa globalité (Read et al., 2021). Dans ce sens, l'utilisation de l'approche systémique, développée et utilisée en grande partie dans des secteurs critiques de la sécurité (Hulme et al., 2019) peut être un complément à l'analyse des erreurs d'assemblage qui se fait souvent avec des approches plus classiques comme l'analyse de la fiabilité humaine (*Human Reliability Analysis-HRA*) (Blackert et al., 2019; Torres et al., 2021b).

À la lumière du propos présenté préalablement, cette thèse vise à enrichir les connaissances sur l'erreur humaine dans l'assemblage manuel complexe, plus particulièrement l'assemblage des moteurs d'avion. Le premier objectif de la thèse est d'identifier les différents types d'erreurs possible dans l'assemblage manuel complexe et évaluer le risque de ceux-ci et l'influence de certains facteurs contributifs. À cette fin, une démarche d'analyse de la fiabilité humaine a été développée à partir d'une sélection de méthodes et techniques existantes dans la littérature (Torres et al., 2019a). Le deuxième objectif de la thèse vise à analyser plus en détails la charge de travail et la fatigue ressenties par un groupe de travailleurs d'une ligne d'assemblage. Ces deux facteurs sont reconnus comme ayant un impact important sur la performance humaine (Hernandez Arellano et al., 2015; Kolus et al., 2014). Finalement, le troisième objectif de la thèse vise à élargir l'analyse de l'erreur humaine au-delà du contexte immédiat d'assemblage pour tenir compte du système de production et d'autres niveaux de la structure organisationnelle. Les méthodes d'analyse systémique AcciMap, STAMP et HFACS sont utilisées pour l'analyse des erreurs d'assemblage avec une perspective de système.

Nos travaux de recherche devraient également intéresser notre partenaire industriel et l'aidera à identifier et à prioriser des facteurs clés afin de mettre en place une stratégie de réduction de risque d'erreur adéquate. Cette thèse implique également la réalisation d'un travail de terrain important chez le partenaire industriel et l'implication de plusieurs acteurs (gestionnaires de qualité et gestionnaires de production, superviseurs de ligne d'assemblage, travailleurs de ligne d'assemblage, spécialistes de qualité et de production, entre autres). Les résultats de travaux de recherche ont fait l'objet de trois articles de revue scientifique avec comité de lecture : trois articles publiés (Torres et al., 2021b; 2021c; 2022a) cinq articles de conférence internationale (Torres et Nadeau, 2020b; Torres et al., 2019a; 2021a; 2021d; Torres et al., 2022b) et trois articles de vulgarisation scientifique (Torres et Nadeau, 2020a; Torres et al., 2019b; Torres et al., 2021e).

Le Chapitre 1 de la thèse est consacré à une revue de la littérature sur les principaux sujets pertinents à la recherche. Le Chapitre 2 présentera la méthodologie globale de la thèse et détaillera la structure choisie afin d'assurer la continuité des différents travaux de recherche.

Les Chapitres 3-5 correspondent chacun à un article de revue scientifique avec comité de lecture, ceux-ci sont présentés en guise de résultats de la thèse. Par la suite, un bilan des travaux et des perspectives de recherche sera dressé sous forme de conclusion générale et de recommandations. Les annexes présenteront de l'information permettant d'avoir une vision globale et plus complète de travaux réalisés. Dans les appendices on présentera de l'information supplémentaire qui permettra, au besoin, d'accéder à certains détails tel que les formulaires et questionnaires administrés auprès de travailleurs dans les études de terrain.

CHAPITRE 1

REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue critique de la littérature qui tient compte des principaux sujets autour desquels s'articule notre recherche. Le chapitre est divisé en quatre sections comme suit: 1) l'erreur humaine, 2) la charge de travail et la fatigue, 3) l'approche systémique et 4) l'Industrie 4.0. Dans la première section, on traitera le sujet de l'erreur humaine afin de comprendre comment celle-ci a été définie et conceptualisée dans la littérature spécialisée. On abordera également les méthodes d'analyse de l'erreur et les différentes stratégies de mitigation. La deuxième section sera consacrée à approfondir deux facteurs qui sont pertinents à la lumière de notre recherche : la fatigue et la charge de travail. On abordera les principaux concepts, des éléments sous-jacents et les méthodes d'évaluation. La troisième section est consacrée à l'approche systémique. On pourra ainsi mieux comprendre l'origine et l'évolution de cette approche, présenter les principales méthodes d'analyse existantes et discuter de la pertinence de cette approche pour la manufacture et l'erreur humaine. La quatrième et dernière section cherche à élucider le potentiel que certaines technologies de l'Industrie 4.0 offrent pour l'assemblage manuel complexe. Il est important de souligner que la plupart de la littérature consultée dans ce chapitre est en langue anglaise, soit écrite par des auteurs anglophones soit des auteurs de langue maternelle autre que l'anglais, mais qui publient dans cette dernière. Des auteurs allemands comme Hacker (1978) ont consacré des efforts importants à l'étude approfondie des erreurs humaines.

1.1 L'erreur humaine

1.1.1 Définitions et cadre théorique

Plusieurs définitions de l'erreur humaine ont été proposées dans la littérature spécialisée dans le domaine. La plupart de ces définitions s'accordent sur les aspects fondamentaux de l'erreur la considérant comme le résultat de quelque chose que les travailleurs font ou ont l'intention de faire qui mène à des résultats différents de ceux à quoi ils s'attendaient.

D'après Rasmussen (1982), il est très difficile de donner une définition satisfaisante des erreurs humaines. Souvent, elles sont identifiées après coup. En règle générale il existe une notion de déviation par rapport à un résultat attendu et il y a aussi la notion d'actions qui se matérialisent ou pas, mais qui mènent à ladite déviation. Swain et Guttman (1983) définissent les erreurs humaines comme « tout membre d'un ensemble d'actions humaines qui dépassent une certaine limite d'acceptabilité, c'est-à-dire, une action hors tolérance, où les limites de performance tolérable sont définies par le système ». Néanmoins, dans le Tableau 1.1 on peut voir quatre définitions du concept d'erreur humaine parmi les plus citées dans la littérature spécialisée dans le domaine.

Tableau 1.1 Quelques définitions de l'erreur humaine dans la littérature

Source	Définition (traduit de l'original en anglais).
(Rasmussen, 1982)	« Si un système fonctionne de manière moins satisfaisante que d'habitude - en raison d'une erreur humaine ou d'une perturbation qui aurait pu être neutralisée par une action humaine raisonnable - la cause sera très probablement identifiée comme une erreur humaine ».
(Reason, 1990b)	« Un terme générique pour englober toutes ces occasions pendant lesquelles une séquence planifiée des activités mentales ou physiques n'atteint pas le résultat escompté, et quand ces échecs ne peuvent pas être attribués à l'intervention d'un facteur aléatoire ».
(Senders et Moray, 1991)	« Quelque chose qui a été fait et qui n'était pas l'intention de l'exécuteur, non plus prévu par l'ensemble de règles ou un observateur externe, ou qui mène la tâche ou le système hors de ses limites acceptables ».
(Sarter et al., 2010)	« Une variété spécifique de performance humaine qui est clairement et significativement inférieure aux standards lorsqu'on la considère rétrospectivement qu'il ne fera aucun doute que l'exécuteur ait dû la considérer comme étant de qualité inférieure au moment où l'acte a été commis ou omis ».

La définition de Reason (1990b) lie les erreurs à des actions planifiées où il y a l'intentionnalité de l'action. Ces actions n'atteignent pas l'objectif désiré, car elles ne se déroulent pas en accord avec le plan ou, car le plan lui-même n'est pas adéquat pour atteindre l'objectif. Cette définition d'erreur humaine est la base de plusieurs développements menés par Reason, auteur considéré comme l'un des instigateurs de l'étude de l'erreur humaine et de la sécurité industrielle (Larouze et Guarnieri, 2015). D'autre part, certaines discussions ont eu lieu quant à la

pertinence d'utiliser le terme erreur humaine (Dekker, 2014; Hollnagel, 1993) à cause de sa possible connotation négative. Bien que ce type de discussion dépasse la portée de la thèse de doctorat, il faut préciser que, tout au long du présent document, l'utilisation du terme classique « erreur humaine » n'a aucune implication personnelle ou morale, ce qui est en cohérence avec les travaux de Kirwan (1992).

Plusieurs cadres théoriques et modèles conceptuels ont été proposés dans la littérature pour l'étude de l'erreur humaine. Par exemple, la psychologie héritière de Freud, reconnaissait l'erreur comme un produit des pulsions inconscientes de la personne et ceux qui commettaient des erreurs étaient considérés comme moins efficaces et peut-être plus déficients que les autres. Les chercheurs de cette école de pensée sont arrivés à une théorie affirmant qu'il existerait des personnes plus susceptibles de commettre des erreurs à cause de leur personnalité (Greenwood et Woods, 1919). Ces propos ont été contestés à cause de certaines déficiences méthodologiques dans les études qui ont servi de base à cette théorie. Dans ce sens Lawton et Parker (1998) font une réflexion très complète des limitations de l'approche centrée sur la personnalité de l'individu. Grayson et Maycock (1987) ont souligné que, à cause de la combinaison de problèmes méthodologiques et de certaines incohérences constatées dans les études, "il est presque inévitable que l'étude des différences individuelles entre dans une phase de déclin face à l'approche systémique émergente".

On peut identifier les travaux de Jens Rasmussen parmi les plus influentes contributions dans les domaines de la sécurité industrielle, l'erreur, l'enquête et l'analyse des accidents (Dekker, 2017; Leveson, 2017). Le modèle proposé par Rasmussen (1983) est devenu une référence dans la perspective cognitive en définissant trois niveaux de performances de l'opérateur. Le modèle est connu comme le schéma de classification SKR : *Skills, Rules and Knowledge*. Le premier niveau (Skills) dans le modèle est utilisé pour faire face aux situations familières et connues et dans celui-ci le cerveau fonctionne sur des automatismes. Le deuxième niveau (Rule) s'active lorsque la situation n'est plus totalement familière, mais possède certains aspects connus. Le cerveau utilise alors des règles de type SI... ALORS... pour faire évoluer la situation vers un état familier. Un dernier niveau (Knowledge), est associé à des

connaissances générales qui sont utilisées pour faire face à des situations nouvelles où il n'y a pas d'automatismes ni des règles. C'est un niveau où la charge cognitive est plus élevée.

James Reason a élargi l'objet des définitions antérieures et a distingué davantage les types d'erreurs de base associées à chaque niveau de performance de l'opérateur. Dans ce sens, cet auteur a développé un système de classification connu comme GEMS : *Generic Error Modeling System*. Ce système constitue une taxonomie de l'erreur humaine où l'auteur présente une vue intégrée des mécanismes générateurs des erreurs en correspondance avec les différents niveaux de performance proposés par Rasmussen dans son modèle SRK (Larouée et al., 2014). Reason a introduit également dans le système de classification GEMS la distinction entre les erreurs et les violations, les deux sont des actes dangereux (*unsafe acts*) qui résultent d'intentions inappropriées ou d'un diagnostic erroné de situations (Reason, 1990b). La Figure 1.1 présente la taxonomie GEMS proposée par Reason.

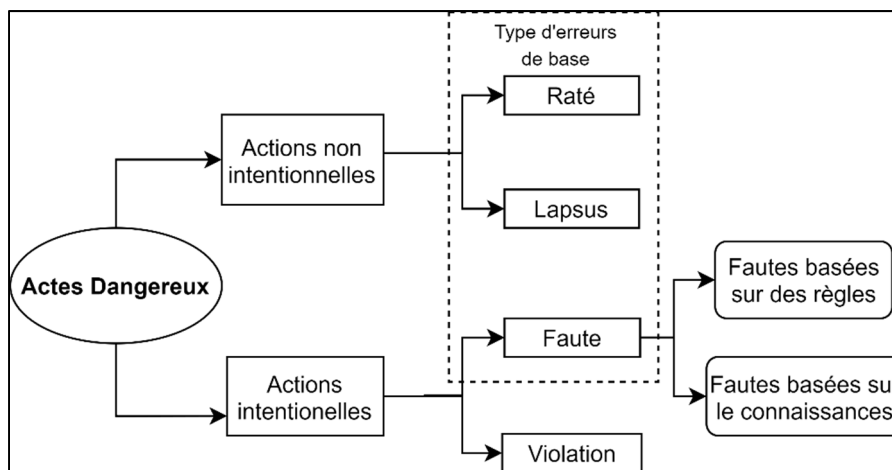


Figure 1.1 Taxonomie d'actes dangereux
Adapté de Reason (1990b, p.63)

Sharit (2012) définit trois perspectives d'étude de l'erreur humaine : (1) la perspective de l'ergonomie/génie de facteurs humains dans laquelle l'erreur est considérée comme le résultat de l'inadaptation entre les demandes de la tâche et les capacités physiques et mentales de l'humain (2) la perspective cognitive qui cherche à étudier les mécanismes d'acquisition et de représentation de l'information chez l'humain et comment celui-ci les utilise pour guider ses actions et (3) la perspective socio-technologique qui se centre sur l'impact potentiel des

politiques managériales et de la culture organisationnelle qui façonnent le contexte où les humains agissent.

Sharit (Sharit, 2006) propose un cadre de référence pour la compréhension de comment l'erreur humaine se produit et peut mener à un résultat défavorable. Le modèle présenté de manière simple (voir Figure 1.2) est constitué de trois composantes principales. En premier lieu, la faillibilité humaine, qui concerne les limitations sensorielles, cognitives et motrices qui caractérisent les humains et qui les prédisposent à l'erreur. En deuxième lieu, le contexte, qui fait référence aux variables situationnelles qui influencent la façon dont la faillibilité humaine se manifeste. La troisième composante, les barrières, représente les différentes manières de contenir les erreurs humaines afin d'éviter les résultats défavorables (accidents, problème de qualité, perte de productivité). Le cadre de référence proposé par (Sharit, 2006) partage certains éléments avec le modèle du fromage suisse proposé par (Reason, 1990b). Par exemple, les barrières sont un concept fondamental dans le modèle du fromage suisse afin d'éviter la propagation des effets indésirables des actes dangereux dans le système. Nonobstant, le cadre de référence de la Figure 1.2 montre comment l'erreur humaine et le résultat d'une interaction entre la faillibilité humaine et le contexte tandis que les barrières ne sont qu'une des trois composantes du cadre de référence. Il est important de noter que, dans la pratique, les facteurs représentés à l'intérieur des composantes "faillibilité humaine" et "contexte" ont une complexité interactive. Par exemple, dans certains contextes, le travail par quart peut avoir un impact sur le flux d'information. Notamment, quand un changement de quart de travail implique le transfert d'information entre les travailleurs qui sortent et ceux qui rentrent. Dans le secteur de soins médicaux, un transfert incorrect ou incomplet de l'historique du patient peut augmenter la probabilité d'erreur et compromettre la sécurité du patient (Raeisi et al., 2019). Des situations semblables peuvent se produire également dans le secteur de l'aéronautique (Yiannakides et Sergiou, 2019)

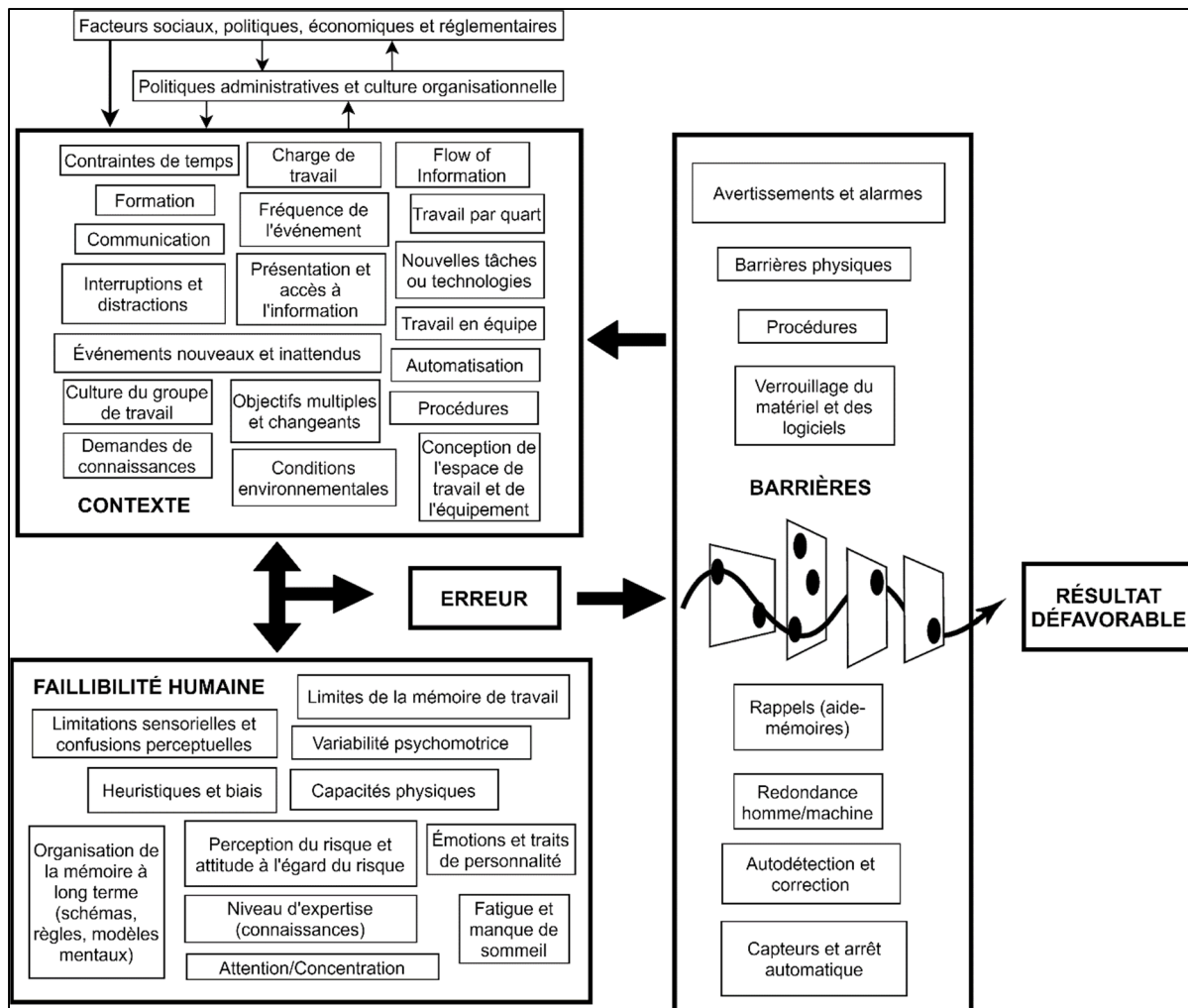


Figure 1.2 Cadre pour la compréhension de l'erreur humaine
Traduit en français de Sharit (2006, p.711)

D'après Reason (2000), il y aurait deux approches pour aborder la problématique de l'erreur humaine (Table 1.2). Chaque approche comprend son propre modèle causal avec des visions différentes. L'une des bases de l'approche centrée sur la personne est la théorie du choix rationnel, c.-à-d., la théorie selon laquelle une personne peut de façon consciente choisir la bonne option qui mène toujours aux bons résultats (Dekker, 2017). Rasmussen (1990) considère plutôt que les résultats indésirables des actions ne sont pas la conséquence d'un mauvais choix de l'humain, mais plutôt le produit des interactions normales entre les personnes et les systèmes, des interactions considérées comme ponctuellement rationnelles et par lesquels le contrôle est souvent maintenu et parfois perdu. Cependant, dans des domaines très litigieux

du point de vue légal où les demandes économiques par négligence peuvent représenter des millions de dollars, l'approche centrée sur la personne tend à avoir sa place. Le secteur de l'aviation et le domaine médical en sont quelques exemples. Cela répond souvent aux systèmes juridiques d'assurance qui se basent sur la détermination de culpabilité afin de définir qui paye pour la perte matérielle ou de vies. Toutefois, il a été reconnu que cette approche n'est pas avantageuse si l'on cherche à améliorer la performance du système et peut être même contre-productive menant à une culture où les individus ont peur des conséquences (Reason, 2000).

Tableau 1.2 Résumé de deux approches pour aborder la problématique de l'erreur humaine
Élaboré à partir de Reason (2000, p. 768)

Approche	Description
L'approche centrée sur la personne	Se concentrer sur les actes dangereux (erreurs et violations procédurales) des personnes. Elle considère que ces actes dangereux découlent principalement de processus mentaux aberrants tels que l'oubli, l'inattention, le manque de motivation, la négligence et l'imprudence. Naturellement, les solutions associées visent principalement à réduire la variabilité indésirable du comportement humain.
L'approche centrée sur le système	Le principe de base de l'approche systémique est que les humains sont faillibles et que des erreurs sont à prévoir, même dans les meilleures organisations. Les erreurs sont perçues comme des conséquences plutôt que des causes, car leur origine n'est pas tant dans la perversité de la nature humaine que dans les facteurs systémiques « en amont ».

L'approche centrée sur le système sera abordée plus en détails dans le Chapitre 5 de la thèse qui est consacré spécifiquement à ce sujet. Il suffit de dire ici que dans l'approche centrée sur le système on ne considère pas l'erreur humaine comme une cause, mais plutôt comme une conséquence (Reason, 2000; Stanton et Harvey, 2017). Dans cette thèse, on choisit d'inscrire l'analyse de l'erreur humaine dans une perspective ergonomique liée à la conception du système de travail. D'après cette perspective le comportement humain est rarement la seule cause d'une erreur ou d'un accident et la performance humaine est plutôt le résultat d'un groupe d'interactions complexes de différents facteurs à l'intérieur du système (Wiegmann et Shappell, 2001).

1.1.2 L'analyse de l'erreur humaine

L'erreur humaine a été souvent étudiée lors des analyses d'accidents majeurs dans les domaines critiques pour la sécurité: centrale nucléaire, industrie chimique, exploitation de plateforme pétrolière, transport aérien, entre autres. La gravité associée à ce type d'accident fait en sorte qu'il y a un intérêt constant à améliorer la performance de ce type de systèmes. Le domaine qui comprend l'analyse structurée de l'erreur humaine en utilisant différentes méthodes et techniques est connu comme : analyse de la fiabilité humaine ou *Human Reliability Analysis* (HRA) en anglais (Kirwan, 1994). Pour entreprendre l'analyse de l'erreur humaine, deux approches majeures existent: l'approche causale ou qualitative et l'approche probabiliste ou quantitative (Rouse et Rouse, 1983). Ces approches ne s'excluent pas mutuellement. L'approche causale part du principe que les erreurs peuvent être attribuées à des causes et à des facteurs contributifs qui, une fois isolés, peuvent être éliminés ou au moins améliorées. Dans l'approche causale, on parle de la possibilité de l'erreur et pas de la probabilité de l'erreur. Cette approche s'intéresse surtout à l'identification de différents modes d'erreurs (Kirwan, 1992). Selon (Baber et Stanton, 1996), "l'objectif des méthodes qualitatives est de définir les interactions entre les humains et le système qui sont susceptible d'entraîner des erreurs". De cette manière elles servent à identifier la possibilité des erreurs humaines ainsi que les moyens de l'éviter.

Pour ce qui est de l'approche probabiliste, celle-ci est généralement choisie par ceux/celles qui s'intéressent au calcul de la fiabilité humaine dans le cadre d'une analyse des risques de type *Probabilistic Risk Assessment* (PRA). Bien que l'origine de l'approche quantitative ou probabiliste remonte au début des années 1960 (Swain, 1964; Swain et al., 1963), c'est dans les années 1980s, à la suite de l'accident de Three Mile Island, que son développement le plus important a eu lieu. Ce développement a été lié aux exigences de performance du secteur nucléaire américain basées sur les politiques et procédures de la Commission de réglementation nucléaire américaine (IAEA, 1989; Kirwan, 1995). Ainsi, mathématiquement, l'erreur humaine est traitée de la même manière que la défaillance d'un composant technique. Cette approche suppose qu'une probabilité peut être liée à l'occurrence d'une erreur, c'est ce qu'on appelle la probabilité d'erreur humaine (HEP). Cette probabilité peut être modifiée selon

certains facteurs identifiés dans le contexte de travail appelé *Performance Shaping Factors* (PSF) ou *Error Producing Conditions* (EPC). Une explication plus en détails de comment ces méthodes quantitatives fonctionnent peut être trouvée dans les travaux de Swain et Guttman (1983), Kirwan (1995) et Williams (2015).

En ce qui concerne la démarche d'analyse, celle-ci est constituée en général de plusieurs étapes. Selon Pan et al. (2016), ces étapes peuvent être définies comme suit : « (1) identification de l'erreur humaine, (2) estimation de la probabilité d'erreur humaine, (3) analyse des conséquences de l'erreur humaine et (4) conception de mesures d'évitement des conséquences ». Le processus d'analyse de l'erreur humaine en dix étapes proposé par Kirwan (1994) est l'une des démarches proposées dans la littérature. En général, le processus d'analyse de l'erreur humaine évolue d'une analyse de type qualitative descriptive vers une analyse plus quantitative qui implique le calcul des probabilités d'erreurs humaines. Il existe ainsi trois niveaux d'analyse dans la démarche, quel que soit le nombre d'étapes que comporte le processus proposé par l'auteur. Le nombre d'étapes dépend davantage du niveau de détail que l'auteur cherche à fournir comme ligne directrice au praticien potentiel pour réaliser l'analyse de l'erreur. Les trois niveaux d'analyse sont: l'analyse détaillée de la tâche, l'analyse de la possibilité d'erreur humaine et l'analyse des probabilités d'erreur humaine.

Dépendamment de l'approche que l'on suit dans l'analyse, il n'est pas nécessaire de se rendre jusqu'au troisième niveau d'analyse. L'approche causale a développé son propre éventail de techniques (Kirwan, 1992). Ces techniques sont connues sous le nom de techniques d'identification de l'erreur humaine (*Human Error Identification-HEI*). Le choix d'une technique pour effectuer une analyse de l'erreur humaine peut représenter un défi majeur, en raison du grand nombre de techniques disponibles dans la littérature, tant du point de vue de l'identification de l'erreur que de la quantification (Holroyd & Bell 2009 ; Lyons 2009). Le Tableau 1.3 montre des exemples de méthodes utilisées dans les études de la fiabilité humaine selon les trois niveaux d'analyse.

Tableau 1.3 Quelques exemples de techniques selon le niveau dans la démarche d'étude de l'erreur humaine
Tiré de Kirwan (1994, p. 371)

Niveau I : analyse de la tâche	Niveau II : identification de l'erreur	Niveau III : quantification de l'erreur
Task analysis Cognitive task analysis Hierarchical task analysis Tabular task analysis Event Tree Operator Event Tree	SRK (<i>Skill, Rule, Knowledge</i>) GEMS (<i>Generic Error-Modelling System</i>) SHERPA (<i>Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach</i>) HEIST (<i>Human Error Investigation Software Tool</i>) HFMEA (<i>Human Failure Mode and Effects Analysis</i>) HFACS (<i>Human Factors Analysis and Classification System</i>) TRACEx (<i>Technique for the Retrospective and Predictive Analysis of Cognitive Errors in Air Traffic Control</i>)	THERP (<i>Technique for Human Error-Rate Prediction</i>) HEART (<i>Human Error Assessment and Reduction Technique</i>) SLIM-MAUD (<i>Success Likelihood Index Method and Multi-Attribute Utility Decomposition</i>) ATHEANA (<i>A Technique for Human Event Analysis</i>) CREAM (<i>Cognitive Reliability and Error Analysis Method</i>)

Les techniques pour l'étude de la fiabilité humaine (quantification de l'erreur) ont souvent été classifiées selon plusieurs critères. Une façon commune de classifier ces techniques est en termes de première et seconde génération (Holroyd et Bell, 2009; Pan et al., 2016; Sharit, 2012). La première génération comprend des techniques développées fondamentalement avant les années 90: THERP, HEART et SLIM-MAUD, entre autres. Les techniques de première génération sont souvent identifiées comme des techniques qui envisagent l'humain comme un équipement en calculant le HEP et qui sont centrées sur les manifestations externes de l'erreur (phénotypes) sans modèles cognitifs sous-jacente (Pan et al., 2016). Les techniques de deuxième génération visent en général à approfondir l'aspect cognitif de l'erreur humaine et tentent de combler les lacunes des techniques de première génération (Sharit, 2012), des exemples : ATHEANA, CREAM et ADS-IDAC. Ces techniques sont fondées sur une base cognitive du comportement humain (Pan et al., 2016). Cependant les bénéfices de l'utilisation des techniques de seconde génération par rapport aux techniques de première génération restent encore à valider (Holroyd et Bell, 2009). Sharit (2012) remarque le fait que toutes ces techniques, sans égard à la génération, reposent dans une certaine mesure sur l'utilisation de jugements d'experts.

Le choix d'une technique en particulier pour réaliser l'analyse de l'erreur humaine, peut représenter un défi important à cause du grand nombre de techniques disponibles dans la littérature. Faire une révision détaillée de chaque technique peut s'avérer extrêmement long pour l'utilisateur potentiel. Néanmoins, il existe quelques revues de la littérature conduites d'une manière systématique qui fournissent une synthèse de chaque technique et de ses principaux éléments (Holroyd et Bell, 2009; Lyons, 2009). Cela permet de se situer par rapport à ce vaste univers de techniques. Dans l'une de ces révisions réalisées par le *Health and Safety Executive* (HSE)¹ du Royaume-Uni, les auteurs utilisent une liste préliminaire de 72 des outils et acronymes potentiellement relatifs à la fiabilité humaine pour plus tard arriver à une liste finale de 17 méthodes retenues comme ayant un potentiel élevé pour être utilisées par les différents départements du *HSE* (Holroyd et Bell, 2009). Il faut préciser que les critères de sélection étaient basés sur des aspects d'utilisation potentielle au sein du HSE : la portée, l'information disponible dans la littérature, l'utilisation potentielle selon le secteur, la validité et les ressources nécessaires pour la mise en œuvre. Les critères choisis pour la révision peuvent être considérés utiles dans un cadre général et le rapport constitue une référence importante pour entamer le processus de choix d'une technique.

De manière similaire, Lyons (2009) propose un cadre de référence afin de guider les utilisateurs novices dans leur choix de méthode d'analyse de fiabilité humaine. Le cadre proposé utilise une approche axée sur l'utilisateur potentiel qui tient compte des ressources disponibles et de différentes contraintes liées à la mise en place d'une telle analyse. En définissant les critères et besoins du terrain, il est possible de se servir du cadre développé par Lyons (2009) pour choisir une technique adaptée au contexte particulier d'intervention. L'auteure part d'une liste initiale de 134 techniques d'analyse de la fiabilité humaine issues d'une recherche sur plusieurs bases de données. Un raffinement de la liste initiale pour éliminer les différentes variantes des techniques ainsi que des techniques très peu répertoriées mène à une liste finale de 35 techniques. Des tableaux sont proposés pour regrouper les techniques selon différents aspects

¹ Le *Health and Safety Executive* est l'organisme responsable de la promotion, de la réglementation et de la surveillance de conditions liés à la santé, sécurité et bien-être au travail ainsi que le responsable de la recherche sur les principaux risques de nature professionnel au Royaume-Uni

nécessaires à la mise en application de la technique : le personnel nécessaire pour mener la technique (nombre et expertise), le nombre de participants, temps nécessaire pour l'application, nature et aspect de l'information traitée, besoin de logiciel ou équipement particulier, entre autres.

1.1.3 L'erreur humaine dans l'assemblage manuel

Une ligne d'assemblage peut être considérée comme un processus de fabrication où des pièces sont systématiquement ajoutées à travers un flux de travail pour obtenir un produit final. Ce système de manufacture est généralement associé à la production de biens de consommation de masse: production à grand volume, à faible coût et standardisée (Mukund Nilakantan et al., 2017; Wilson, 2014). Les chaînes d'assemblage ont systématiquement évolué depuis les progrès d'Henry Ford dans la fabrication automobile avec le modèle T (Alizon et al., 2009). L'évolution technologique dans l'automobile s'est produite vers un assemblage en grande partie automatisé ou, la plupart du temps, vers un assemblage hybride où l'humain joue encore un rôle, mais se limite principalement à des phases spécifiques du processus. Selon des critères tels que la complexité du produit, la productivité et la flexibilité, les ingénieurs peuvent choisir entre des systèmes d'assemblage manuels, automatisés ou hybrides (Lotter et Wiendahl, 2009).

Lotter et Wiendahl (2009) soutiennent qu'un système d'assemblage efficace est absolument essentiel au rendement du processus de fabrication dans son ensemble. Indépendamment du niveau croissant d'automatisation qui a caractérisé la manufacture depuis quelques décennies, les systèmes d'assemblage manuels jouent toujours un rôle important, en particulier dans certains domaines de fabrication comme l'automobile, l'électronique et la manufacture aérospatiale (Swift et Booker, 2013).

L'assemblage manuel comprend la composition de composants ou de sous-ensembles fabriqués antérieurement en un produit complet ou en une unité d'un produit, effectuée principalement par des opérateurs humains qui font preuve de dextérité, de compétence et de jugement (Swift et Booker, 2013). Richardson et al. (2004) décrivent l'assemblage manuel comme une activité de résolution de problèmes spatiaux qui nécessite que les travailleurs construisent un modèle

mental pour comprendre et manipuler les informations spatiales. L'assemblage manuel peut en outre être assisté par des systèmes mécanisés ou automatisés pour l'approvisionnement, la manutention, le montage et les opérations de vérification.

Pour que l'assemblage manuel donne un produit final d'un niveau de qualité approprié, plusieurs opérations doivent être exécutées correctement. Par exemple: sélectionner, manipuler et ajuster les pièces, vérifier, appliquer la force, et obtenir et analyser les informations. Malheureusement, ces opérations sont sujettes à l'erreur humaine et représentent des sources potentielles des problématiques de qualité : des connexions mal fixées, un composant manquant, de dommages causés durant l'assemblage, des corps étrangers ou une contamination (Falck et Rosenqvist, 2014; Gates, 2019; Richards, 2018).

En dépit de ce qui précède, dans le secteur manufacturier, le sujet de l'erreur humaine et les aspects cognitifs et organisationnels associés semblent avoir été sous-représentés dans la littérature en comparaison aux exigences physiques du travail (Bruder et al., 2009). Cela en raison de la prévalence des troubles musculosquelettiques (Bao, 2015; Yang et al., 2020) associés à un niveau d'activité physique relativement élevé. Par conséquent, les améliorations de l'ergonomie de fabrication se sont souvent concentrées sur la réduction des charges biomécaniques, telles que les postures non neutres, les mouvements répétitifs, les charges musculaires statiques élevées, les efforts élevés. Plus récemment il semble y avoir un intérêt grandissant sur l'étude de l'assemblage complexe et des éléments liés à la charge cognitive de travail (Berlin et al., 2021; Mattsson et al., 2018a; Thorvald et al., 2019).

Précédemment (Kmenta et al., 2003) ont développé une version de la méthode AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leurs criticités) pour l'analyse des problématiques d'assemblage en intégrant une série des questions contenues dans la méthodologie *Design for Assembly- DFA* (Boothroyd, 1996). AMDEC est une méthode d'analyse des risques permettant de déterminer les défaillances majeures de processus complexes de manière systématique et proactive et qui est utilisée dans le domaine de l'ingénierie de la fiabilité et de la gestion de la qualité (Stamatis, 2003). Plus récemment, l'Institut Fraunhofer pour l'ingénierie de fabrication et l'automatisation en Allemagne a

également développé la Matrice de processus d'erreur, en Allemand *Fehler-Prozess-Matrix-FPM* (Schloske et Henke, 2006). Le FPM a été développé également à partir de AMDEC pour soutenir la planification de la production et prendre en compte les coûts de non-qualité associés à des défaillances dans la production y compris les erreurs d'assemblage. De cette manière, la méthodologie intègre l'approche *Activity-based costing-ABC* (Kaplan et Bruns, 1987) à AMDEC avec une orientation processus et vision holistique de la manufacture (Hillmann et al., 2014). Sur la base des résultats de FPM, il est alors possible de procéder à une optimisation économique globale du processus d'assemblage selon les critères de qualité, de coûts et de productivité (Henke, 2015).

De manière semblable la méthodologie *Quality Function Déploiement-QFD*, utilisée dans le domaine de la qualité, a également été utilisée pour redéfinir la fonctionnalité des produits afin de réduire la complexité de l'assemblage (Armacost et al., 2002). Malgré quelques exemples comme ceux montrés précédemment, l'analyse de l'erreur humaine dans la manufacture n'a pas bénéficié du même essor que dans d'autres secteurs dits critiques pour la sécurité. Nonobstant, il a été reconnu que l'identification et la quantification de l'erreur humaine dans les milieux de fabrication pourraient contribuer à une amélioration du rendement en termes de qualité (Bubb, 2005; Neumann et al., 2016). Alors, pour mieux comprendre les facteurs ayant un impact sur la performance des assembleurs, il semble nécessaire de mener des études permettant de comprendre l'origine de l'erreur humaine dans l'assemblage manuel. Bubb (2005) affirme que l'analyse de la fiabilité humaine est un domaine clé pour améliorer la qualité dans le secteur manufacturier. Néanmoins, une récente revue de la littérature souligne que les études au sujet de la fiabilité humaine dans la manufacture sont relativement rares (Pasquale et al., 2018). Il semblerait que le domaine de la fiabilité humaine s'est surtout concentré dans les environnements à haut risque et moins d'attention a été portée à l'assemblage manuel.

Yang et al. (2012) ont proposé une « nouvelle » méthode pour analyser les problèmes de qualité liés aux erreurs humaines dans l'assemblage de moteurs. Les auteurs utilisent essentiellement une combinaison de la technique CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*) et FTA (*Fault Tree Analysis*) et proposent une modification des catégories

de modes de défaillance contenues dans CREAM. De manière semblable, Paz-Barroso et Wilson (1999) ont proposé un cadre d'intervention pour l'étude de la fiabilité humaine dans le secteur manufacturier. Pour ces auteurs l'erreur humaine est plutôt associée aux perturbations du système et non à des événements catastrophiques ou aigus. Cette proposition se compose de deux modules. Le Module I concerne la sélection des tâches critiques à analyser en s'appuyant sur les données du terrain et les statistiques pour offrir quelques solutions initiales. Le Module II est une modification de l'approche classique d'analyse de fiabilité humaine : identification-quantification-réduction des erreurs (Barroso et Wilson 2000). Le cadre d'intervention est censé être utilisé par les praticiens dans le contexte de la manufacture, bien que certaines formulations mathématiques semblent assez complexes pour les utilisateurs finaux potentiels.

Dans un autre article précédent qui touche le sujet de la fiabilité humaine dans la manufacture Bubb (2005), propose l'utilisation de la technique classique THERP pour le calcul de la probabilité d'erreur dans l'assemblage manuel. L'auteur présente une étude de cas d'un travailleur qui effectue l'assemblage d'un circuit intégré dans une ligne d'assemblage dans l'électronique. Plus récemment, Caputo et al. (2017) ont proposé une démarche spécifique d'analyse des erreurs humaines qui suit une structure similaire à un processus bien établi et proposé antérieurement par Kirwan (1994), mais cette fois-ci la démarche a été développée pour l'activité logistique de *part kitting* qui est liée en grande partie à l'assemblage manuel. Un développement particulièrement intéressant est celui proposé par les auteurs Kern et Refflinghaus (2015b) qui ont mis au point un système expert pour évaluer la fiabilité humaine dans les opérations d'assemblage manuel. Tout cela à partir des connaissances acquises dans des domaines critiques pour la sécurité (par exemple, l'aérospatiale, le nucléaire).

Kern et Refflinghaus (2015b) ont développé une méthode de planification de l'assemblage : MTQM (*Methods Time and Quality Measurement*) qui permet le calcul prospectif des probabilités d'erreurs humaines en lien avec des systèmes de temps prédéterminés. Ils ont proposé une application modifiée de la technique *Expert System for Task Taxonomy* (ESAT), développée en Allemagne pour le calcul de l'erreur humaine dans les domaines critiques pour

la sécurité. Ils ont adapté la technique au cas spécifique de l'assemblage manuel (Kern et Refflinghaus, 2013). Toutefois, les auteurs font clairement remarquer que l'application de la méthode MTQM exige une connaissance approfondie de la méthode de la part de l'utilisateur et pourrait nécessiter des investissements importants en formation, financières et en temps ou l'aide de fournisseurs de services externes (Kern et Refflinghaus, 2015b). Le développement récent d'un logiciel est sensé rendre la méthode MTQM plus accessible aux utilisateurs bien qu'il ne soit pas clair comment obtenir le logiciel ni l'information détaillée nécessaire pour utiliser leur méthode (Refflinghaus et Kern, 2018).

1.1.4 Facteurs contributifs à l'erreur humaine

L'origine des erreurs humaines, selon l'approche systémique (Reason, 2000), est souvent associée à la conception du système de travail ou à certains éléments de l'environnement de travail (éclairage, bruit, ambiance thermique), ou à des facteurs comme la charge de travail, le rythme de travail, le contenu complexe du travail ou des instructions peu claires, entre autres (Eklund, 1999; Erdinç et Yeow, 2011; Kolus et al., 2018). D'après la norme ISO 6385: 2016-Principes ergonomiques de la conception des systèmes de travail, « Un système de travail implique une combinaison de personnes et d'équipements, dans un espace et un environnement donnés, et les interactions entre ces composantes au sein d'une organisation du travail » (ISO, 2016). Dans le cas particulier de la manufacture, une récente revue de la littérature montre comment les exigences de type physique et cognitif ainsi que de facteurs individuels ont un impact sur la performance en termes de productivité, mais aussi en termes d'erreur humaine et qualité (Kolus et al., 2018).

Une récente étude a identifié certains facteurs qui exercent une influence sur la performance humaine dans l'assemblage manuel. Les auteurs ont identifié la conception des tâches, les aspects liés à la cadence/temps de travail, les exigences de la charge physique, les facteurs de motivation extrinsèque, le travail en équipe et la conception de l'interface de l'assemblage (Berlin et al., 2021). Cela se traduit plus particulièrement sur des éléments comme l'expérience et la connaissance des assembleurs, des instructions de travail adéquates, la diminution de la

complexité du produit d'assemblage, et l'utilisation de mécanismes anti-erreurs (*error proof*). En règle générale, deux des effets sur l'humain qui demandent une attention particulière sont la charge de travail et la fatigue. Ceux-ci sont souvent signalés dans la littérature comme étant directement liés à la dégradation de la performance humaine (Fan et Smith, 2017; Gore, 2018). Pour cette raison, la fatigue et la charge de travail seront abordées plus en détails dans la section suivante.

D'un autre côté, quand on pense aux erreurs humaines dans l'assemblage manuel et aux éléments de nature cognitive de la tâche, la complexité est un facteur considéré comme très important (Alkan, 2019; Kong, 2019). Falck et al. (2014) ont constaté que la présence de facteurs de risques ergonomiques et la complexité de la tâche avaient une incidence importante sur le taux de problématiques de qualité liées aux erreurs (Falck et al., 2014). L'étude menée dans l'industrie automobile suédoise a démontré que les tâches plus complexes entraînaient des coûts 22,4 fois plus élevés que les tâches moins complexes. Ces coûts étaient associés à des interventions nécessaires à la suite de problématiques de qualité. En raison de sa pertinence, on abordera ici brièvement les aspects les plus importants en lien avec la complexité dans l'assemblage manuel. Nous nous intéresserons principalement à comment la complexité est définie dans la littérature sur le sujet et son influence sur la charge cognitive et la performance humaine.

D'après Falck et al. (2017), la complexité grandissante des produits manufacturiers impose des exigences très élevées aux travailleurs, en termes de facteurs de charge cognitifs et physiques. Selon le dictionnaire Larousse, la complexité peut être définie comme : « caractère de ce qui est complexe, qui comporte des éléments divers qu'il est difficile de démêler ». Selon la même source, l'adjectif complexe fait référence à ce qui est composé de plusieurs parties ou de plusieurs éléments. Du point de vue de l'assemblage, différentes catégories de complexité ont été définies dans la littérature, mais selon Rodriguez-Toro et al. (2004), en règle générale, les définitions de complexité vont tomber dans une des deux catégories suivantes :

1. *Définitions fondées sur la structure* : Complexité considérée comme une propriété de l'objet (système, produit, etc.), qui dépend du nombre de pièces, de leurs interactions, des possibilités dans leurs interactions et d'autres caractéristiques.
2. *Définitions fondées sur l'information* : Complexité considérée comme une propriété du sujet (observateur), c'est-à-dire qu'elle dépend de la description du système donné par l'observateur, en particulier du langage utilisé et du nombre de descriptions différentes données.

De cette manière on parle souvent de complexité dite « statique » et de complexité dite « dynamique » (Kuzgunkaya et ElMaraghy, 2006). La complexité statique est liée à la structure de l'objet d'assemblage et du système de travail. Cette propriété intrinsèque du système dépend en grande partie de sa conception. La complexité dynamique est une définition fondée en grande partie sur l'information qui est liée aux aspects opérationnels. La complexité statique est alignée avec la perspective de la complexité dite « objective » qui relie la complexité directement aux caractéristiques du processus d'assemblage sans tenir compte nécessairement des caractéristiques des travailleurs. La complexité dynamique est alignée avec la perspective « subjective » qui considère la complexité comme une conjonction entre les caractéristiques du processus et celles du travailleur (Alkan, 2019). Dans la pratique, les deux types de complexité ou de perspectives sur la complexité sont étroitement liées. Par exemple, Richardson et al. (2006) soutient que dans l'assemblage manuel les travailleurs doivent construire une représentation mentale de la tâche afin de comprendre et manipuler l'information spatiale. Selon ces auteurs, en raison de la capacité limitée du système humain de traitement de l'information, la complexité inhérente à l'assemblage peut entraîner une charge cognitive. Cela signifie essentiellement que plus les tâches d'assemblage sont intrinsèquement complexes, plus les erreurs d'assemblage induites par l'opérateur peuvent se produire et plus les coûts de correction seront élevés (Falck et al., 2017).

Cependant, la mesure adéquate de la complexité de l'assemblage fait encore l'objet de discussions au sein de la communauté scientifique. Selon Falck et al. (2017), il existe plusieurs méthodes théoriques d'évaluation de la complexité des assemblages, mais il existe peu de méthodes pratiques applicables. (Rodriguez-Toro et al., 2004) soutiennent qu'il y a un risque

de devenir trop philosophique sur le concept de la complexité et de se perdre dans les définitions, sans pour autant définir un cadre d'application approprié.

Différentes variables interviennent dans la mesure de la complexité, dont l'une est la variété des produits à assembler. Dans la fabrication, un nombre important de variantes et d'options de construction représentent un défi en termes de planification, mais aussi pour l'opérateur. Cette situation est plus marquée dans l'automobile où, selon Falck et al. (2016), « il y a un grand nombre de variantes et d'options de construction et de nombreux choix doivent être faits souvent sous la pression du temps ». Par exemple, dans le cas de l'industrie automobile, une usine d'assemblage typique peut produire des milliers de véhicules différents sur la base d'un niveau élevé d'options de combinaison (Zhu et al., 2008). Richardson et al. (2004) a constaté que du point de vue du travailleur, la nouveauté de l'assemblage, le nombre de sélections possibles, le nombre de composants et les plans symétriques (géométrie de l'assemblage) étaient des éléments prédicteurs d'une complexité élevée mesurée en temps de raisonnement. Dans l'industrie aéronautique, le niveau de sur-mesure de la production est moindre par rapport à l'industrie automobile. Bien que la complexité associée à la variabilité de modèles et variantes du même produit est toujours présente, celle-ci est moindre. Des aspects liés au nombre de pièces, nombre de sélections possibles, et la géométrie du produit à assembler sont clés pour comprendre le niveau de complexité de l'assemblage aéronautique.

Plusieurs méthodes ont été développées dans la littérature afin de mesurer la complexité de l'assemblage manuel. Certaines méthodes sont basées sur des modèles mathématiques très élaborés comme c'est le cas, par exemple, du « *operator choice complexity* » (OCC) développé par Zhu et al. (2008) pour les *Mixed Product Assembly Lines* (MPALs). Cette méthode est un modèle mathématique fondé sur la variété de choix que les travailleurs doivent faire. Alkan et al. (2016) ont proposé une autre méthode pour évaluer la complexité de l'assemblage des produits industriels basée également sur un modèle mathématique en utilisant une représentation des opérations manuelles basée sur des systèmes de temps de mouvement prédéterminés. D'autres méthodes comme le *Complexity Index* sont plus pratiques à cause de sa structure en forme de liste de vérification (Falck et al., 2017). Pour approfondir au sujet de

la complexité et sa mesure en contexte de manufacture, nous proposons aux lecteurs de se référer à (Alkan et al., 2018). Ces auteurs ont réalisé un examen complet des études publiées à ce sujet au cours des deux dernières décennies. Dans notre thèse, nous n'évaluons pas directement le niveau de complexité de l'assemblage ni du point de vue structurel ni dynamique. On évalue plutôt ses possibles effets à travers la mesure de la charge mentale de travail et de la fatigue rapportée par les travailleurs.

1.2 La charge de travail et la fatigue

1.2.1 Définition de charge de travail

La charge de travail est généralement définie à partir de deux composantes du travail : la composante physique et la composante cognitive. Toute activité de travail implique les deux composantes, mais normalement avec différents degrés de sollicitation. De manière générale, il existe des activités de travail où la composante physique joue un rôle prépondérant, tandis que pour d'autres c'est la composante cognitive qui prime. Les deux composantes du travail peuvent être associées à la fatigue si elles dépassent certaines limites humaines (capacité de travail physique et cognitive). La charge de travail (soit physique ou cognitive) fait référence au fardeau imposé par le travail. Nonobstant, selon (Sperandio, 1972) « il faut bien distinguer ce qui est relatif au travail à accomplir et ce qui est relatif à l'opérateur qui l'accomplit, c'est-à-dire ce que ce travail représente pour lui ». Ainsi, pour cet auteur, il y a le niveau d'exigence de la tâche (celle-ci étant définie par ses objectifs) pour ce qui est relatif au travail lui-même et exprimé à l'aide d'unités spécifiques à la tâche, et il y a la charge de travail pour « ce qu'on pourrait appeler le degré de mobilisation du sujet, la fraction de sa capacité de travail qu'il investit dans la tâche ». Pour l'école de l'ergonomie francophone, la charge de travail est associée au concept de « travail réel ». Aux exigences égales d'une tâche (travail prescrit), la charge de travail dépend de caractéristiques individuelles de travailleurs dont leurs « modes opératoires ». Pour Sperandio et d'autres auteurs de l'école française de l'ergonomie (Leplat et Sperandio, 1967), la charge de travail est équivalente au concept de tension développée dans le modèle stress/tension (Rohmert, 1986). Dans le modèle de stress/tension, le stress est défini

comme la somme de tous les facteurs qui affectent le travailleur soit par l'intermédiaire de son système récepteur (organes sensoriels) ou en sollicitant son système effecteur (muscles), au travail (Rohmert et Laurig, 1975). Dans ce même modèle, la tension est entendue comme « tous les effets du stress sur la personne, découlant de ses caractéristiques et capacités particulières ». Ainsi, la tension dépend du stress et des caractéristiques individuelles (par exemple, la capacité physique, l'entraînement) (Rohmert et Laurig, 1975). Dans le modèle Stress/tension, la charge de travail est associée au stress. Le stress est le résultat de la charge de travail (exigence de la tâche) et d'autres éléments de l'environnement et l'organisation (bruit, éclairage, ambiance thermique). C'est une différence par rapport aux auteurs de l'école française (Leplat et Sperandio, 1967) qui comprennent la charge de travail comme l'effort ou tension subis par l'opérateur. La mesure de la charge de travail que nous faisons dans cette thèse et qui sera décrite plus en détails ultérieurement, est de nature subjective (perception de travailleurs) et comprend tant des dimensions de stress comme des dimensions de tension (Hart et Staveland, 1988).

Dans la recherche présentée dans cette thèse, la charge de travail physique des travailleurs dans l'assemblage manuel peut être considérée de faible à modérée tant du point de vue physiologique que du point de vue de la biomécanique. Ce sont les éléments de nature mentale/cognitive qui seraient plus importants dans l'assemblage manuel complexe. Des aspects sensoriels et émotionnels ne sont pas traités dans le cadre de notre recherche. En outre, il a été reconnu que la proportion de la charge cognitive et physique de travail continuera à changer et il y est prévu qu'il y aura davantage d'éléments de nature cognitifs auxquels les travailleurs de lignes d'assemblage devront faire face (Kong, 2019). C'est pour cette raison que des chercheurs tels que Thorvald et al. (2019) se sont intéressés récemment au développement de méthodes d'évaluation de la charge cognitive spécifiquement dans l'assemblage manuel. Nonobstant, le travail physiquement demandant continuera à être présent dans certaines activités manufacturières. Cela comprend, par exemple, les activités liées à la logistique telle que la préparation de commande dans les entrepôts (Battini et al., 2017; Labus et Gajšek, 2018).

1.2.2 Charge de travail mental

Compte tenu de l'impossibilité d'observer les processus mentaux d'un opérateur exécutant une tâche, les ergonomes ont développé plusieurs concepts pour relier l'impact des exigences de la tâche sur l'opérateur humain ainsi que sur la performance du système (Tsang et Vidulich, 2006). La charge mentale est un concept crucial pour comprendre la réaction humaine en interactions avec un système pour atteindre un objectif (Tsang et Vidulich, 2006). Sur le plan théorique, la compréhension de la charge de travail est liée principalement à la recherche sur l'attention (*situation awareness*), la capacité de traitement d'information, la performance en double tâche, et l'allocation des ressources mentales (Schvaneveldt et al., 1997). La norme ISO 10075-1 : 2017 considère la charge de travail mentale comme un terme générique se rapportant à d'autres concepts et éléments et qui n'a pas de signification propre spécifiée ou normalisée (ISO, 2017). Nonobstant, la norme fait la distinction entre la contrainte mentale – terme désignant l'ensemble des facteurs issus de sources externes exercés sur un être humain – et l'astreinte mentale – notion qui désigne l'effet de cette contrainte chez l'individu en fonction de ses caractéristiques, capacités, compétences, etc. De cette manière, en ergonomie/génie de facteurs humains (HF/E) et ses applications, le terme charge de travail, peut se rapporter à une contrainte mentale, à une astreinte mentale et à leurs effets, c'est-à-dire à la fois aux causes et aux effets (ISO, 2017).

Il est important de noter que la charge mentale de travail se distingue de la charge psychique en ce que la première est essentiellement cognitive, tandis que la charge psychique comprend également des aspects émotionnels comme les conflits interpersonnels (Makowiec-Dabrowska et Bortkiewicz, 1990). Les termes de charge mentale, psychique, psychomotrice, psycho-émotionnelle, psychosociale, et autres sont souvent utilisés comme synonymes ou pour parler globalement de 'stress' (sentiment d'être dépassé ou incapable de faire face à une pression mentale ou émotionnelle.). Ici, nous nous intéressons surtout aux éléments de nature cognitive et c'est dans ce sens que la charge de travail mentale est abordée.

Selon Mincent et al. (2005) « (...) il est important de faire la distinction entre la charge en tant que caractéristique de la tâche, et donc des exigences qu'elle impose à tout opérateur, et la

charge en tant que conséquence, pour un opérateur donné, de l'activité qu'il met en œuvre pour répondre à ces exigences ». Ces auteurs ont mené une évaluation de la charge de travail des opérateurs d'une centrale nucléaire en France, la charge mentale de travail a été définie comme suit:

« La charge de travail est ici considérée comme l'astreinte psychophysiologique imposée à l'opérateur par l'exécution des tâches qui composent cette activité de pilotage d'un processus dynamique. Elle est de nature multidimensionnelle et sa complexité implique que l'on ne peut en rendre compte par un indicateur unique ».

Il existe trois grands types de mesures de la charge de travail mentale: les cotes subjectives, la mesure de la performance de l'opérateur et les mesures physiologiques (Gore, 2018; Schvaneveldt et al., 1997; Tsang, 2006). Si l'on s'en tient au modèle Stress/tension, dans les trois cas ce sont des mesures de tension et pas de mesure de la charge en tant que telle (Rohmert et Laurig, 1975). La perception subjective est une mesure de tension. Nous choisissons ici de suivre l'approche qui prend les mesures de tension comme mesure de la charge de travail comme c'est le cas de la méthode utilisée dans cette thèse pour l'évaluation subjective de la charge de travail (Hart et Staveland, 1988). De façon synthétique, les mesures subjectives sont liées à la perception de l'opérateur sur les exigences mentales et sont généralement présentées sous forme d'échelles de Likert; les mesures de performance cherchent à mesurer objectivement les aspects de la performance des opérateurs (p. ex., la vitesse ou la précision avec laquelle un opérateur est capable d'effectuer une tâche); les mesures physiologiques détectent des changements dans le corps de l'opérateur qui peuvent être liés aux exigences de la tâche (p. ex., conductivité de la peau, fréquence cardiaque, mouvements oculaires); les méthodes analytiques sont associées à la modélisation de l'effort (Tsang, 2006).

Plus récemment les neurosciences ont commencé à collaborer avec l'ergonomie afin de proposer une nouvelle approche pour la mesure de la charge de travail mentale et la performance humaine (Dehais et al., 2020). Ce développement connu comme « Neuroergonomie » en est encore à ses débuts et utilise de techniques biomédicales tel que l'EEG et la tomographie crânienne. En robotique collaborative la recherche d'un moyen

d'adapter le contrôle d'un système autonome à la charge cognitive de son opérateur est un sujet d'intérêt (Urrestilla et St-Onge, 2020).

Dans cette thèse, les mesures de la charge de travail que nous avons privilégiées sont les mesures subjectives y compris la composante de la charge mentale ou cognitive (réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.). Dans un contexte de terrain, les mesures subjectives sous forme d'échelles sont plus simples à administrer (papier/crayon) et interfèrent peu avec le travail effectué par l'opérateur. Les mesures subjectives de la charge de travail se concentrent sur les ressentis de l'opérateur sur sa charge de travail. Plusieurs mesures subjectives de la charge de travail existent dans la littérature (Gore, 2018). La *Subjective Workload Assessment Technique* (SWAT), le *National Aeronautics and Space Administration Task Load Index* (NASA-TLX) et le *Workload Profile* (WP) sont parmi les plus utilisés et validés (Zhang et Luximon, 2005). Les critères utilisés pour réaliser le choix de la méthode utilisée pour évaluer la charge de travail seront décrits ultérieurement dans la thèse.

1.2.3 Définition de la fatigue

Selon Williamson et al. (Williamson et al., 2011), la fatigue est considérée une construction (*constructor*), qui relie une série de facteurs qui causent présumément de la fatigue à des conséquences liées à la performance. Les termes fatigue et somnolence sont souvent utilisées comme synonymes alors qu'ils sont deux concepts différents, mais les deux sont des conséquences possibles d'une charge de travail élevée. Selon Lerman et al. (2012) la somnolence est la tendance à s'endormir, tandis que la fatigue est la réponse du corps dû au manque de sommeil ou à l'effort physique ou mental prolongé. Yung et al. (2020) ont regroupé la fatigue en trois catégories principales: (1) cognitive/mentale/centrale, (2) physique/neuromusculaire/périphérique, et (3) perceptive/visuelle. Cependant, indépendamment des différentes catégories, toutes les formes de fatigue peuvent réduire les capacités de performance (Barker et Nussbaum, 2011; Fan et Smith, 2017; Lamond et Dawson, 1999).

Dans la littérature, une distinction est faite souvent entre la fatigue et certains autres états assimilables à la fatigue. Parmi ces états on trouve la monotonie, la baisse de la vigilance et la saturation psychique. La fatigue elle-même, une fois installée, ne peut être surmontée que par des pauses de récupération et le sommeil tandis que les états similaires à la fatigue peuvent, en revanche, être surmontés par un changement d'activité. De manière semblable, la fatigue chez les humains, est une problématique qui dépasse le contexte de travail. La fatigue peut être aussi liée à des conditions de santé, en particulier, des maladies chroniques qui épuisent l'organisme (Swain, 2000) ou à la pratique des sports (Phillips, 2015).

Du point de vue conceptuel, dans cette thèse nous choisissons d'adhérer à la définition de fatigue proposée par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (ICAO, 2019). Nous avons fait de légères modifications pour adapter cette définition à un contexte de travail plus large au-delà du domaine spécifique de l'aviation. La définition est comme suit :

« État physiologique qui se caractérise par une diminution des capacités mentales ou physiques dû à des facteurs chronobiologiques (manque de sommeil, période d'éveil prolongée, phase du rythme circadien) ou à la charge de travail (mentale ou physique) qui peut réduire la performance d'un travailleur et sa capacité à exécuter une tâche de manière sécuritaire où à arriver à des résultats attendus en termes de qualité et productivité »

1.2.4 Fatigue et performance

La fatigue conduit à une dégradation importante de la performance en particulier les capacités qui comprennent la prise de décision et le jugement, la mémoire, le temps de réaction et la vigilance (Sharit, 2006). En tant que processus graduel et cumulatif, la fatigue se traduit par une diminution de la capacité de performance, ainsi que des états subjectifs associés à cette diminution de performance comme le désintérêt à poursuivre l'exécution de la tâche en cours et retrait progressif de l'attention (De Vries et al., 2003). Il s'agit d'un phénomène psychophysiologique global qui diminue la capacité de l'individu à effectuer une tâche particulière (Thiffault et Bergeron, 2003). Au niveau physique, la fatigue est associée à une baisse progressive de la force maximale, une diminution de la durée de maintien de cette force

ainsi qu'une diminution de la précision des mouvements (positionnement, corridor de trajectoire élargi, temps de réponse allongé). Elle a été considérée comme un facteur contribuant à des accidents dans un large éventail de milieux, dus au fait que les personnes fatiguées ont une tendance à se centrer davantage sur la production de résultats que des actions sécuritaires (Miller, 2008). Les opérations de transport telles que routier, aérien, ferroviaire et maritime, ainsi que des milieux de travail (par exemple, les hôpitaux, les opérations d'urgence, forces de l'ordre) sont particulièrement à risque surtout lorsque des heures de travail irrégulières sont impliquées (Noy et al., 2011; Transports Canada, 2007; Williamson et al., 2011).

Selon Lerman et al. (2012) toutes les compagnies dont les personnels travaillent pendant des heures prolongées ou pendant des heures où les individus sont censés dormir (travail par quart) devraient fournir une attention particulière à la gestion de la fatigue au travail. Tout cela en raison de l'impact potentiel de la fatigue sur la santé, la sécurité et la performance (Lerman et al., 2012; Wilson et al., 2007). Pour Williamson et al. (2011), la fatigue constitue une sorte d'interface qui relie une série de facteurs qui sont censés causer de la fatigue avec un certain nombre de résultats liés à la sécurité. La fatigue est donc, le mécanisme par lequel le lien existe. On peut observer cette relation de façon schématique sur la figure 1.3. Il faut souligner que dans la littérature on utilise le terme fatigue pour faire référence à la fatigue globale. Le cas échéant, on utilise fatigue mentale, physique ou musculaire pour préciser les propos.

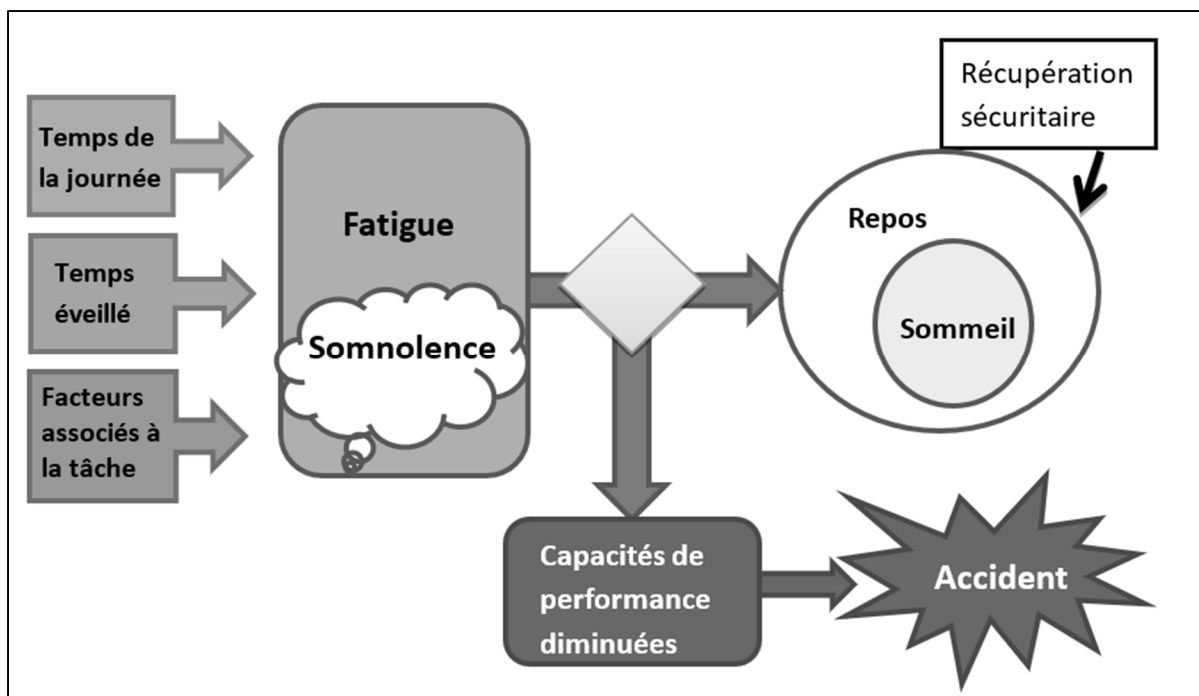


Figure 1.3 Cadre conceptuel pour examiner la relation entre la fatigue et la sécurité
Traduit en français de Williamson et col. (2011, p. 499)

La Figure 1.3 est une représentation simplifiée du lien entre la situation de travail, la charge et la fatigue. Dans les facteurs associés à la tâche on doit également tenir compte des influences de l'environnement sur la fatigue (p. ex. chaleur ou bruit).

1.2.5 Mesures de la fatigue

Actuellement, la fatigue est mesurée par l'auto-évaluation (en demandant aux personnes si elles ressentent de la fatigue, de la lassitude ou de la somnolence) et par le calcul prédictif de la fatigue à partir des patrons de sommeil et de travail déclarée par les personnes concernées. Il est reconnu qu'il n'existe pas de méthode standard pour évaluer la fatigue (De Vries et al., 2003). Bien que certaines mesures de type objectives puissent être utilisées comme mesure de fatigue, dans la réalité ces mesures se concentrent sur les processus physiologiques sous-jacents ou l'impact sur la performance (temps de réaction ou le nombre d'erreurs). Ceux-ci peuvent être le résultat de la fatigue ou pas. La fatigue est un facteur intermédiaire. Dans le modèle présenté sur la Figure 1.3, il est clair qu'une dégradation de la performance peut être

le résultat d'une accumulation importante de fatigue ou une charge de travail élevée, mais aussi cela peut être associé à certains facteurs environnementaux (p. ex., éclairage, bruit).

Dans une récente revue de la littérature, les auteurs ont identifié 24 échelles d'autoévaluation de la fatigue (Gawron, 2016). Il existe certaines méthodes d'autoévaluation qui sont multidimensionnelles et d'autres qui sont unidimensionnelles. Le *Swedish Occupational Fatigue Inventory* (SOFI) est un questionnaire pour mesurer la fatigue qui comprend cinq dimensions : manque d'énergie, effort physique, inconfort physique, manque de motivation et somnolence (Åhsberg et al., 1997). Une échelle qui est utilisée fréquemment pour mesurer la fatigue est l'échelle de Borg CR-10 (Borg, 1982), bien que celle-ci évalue plutôt l'effort physique et l'épuisement perçus. D'autres échelles unidimensionnelles sont l'échelle Samn-Perelli (Samn et Perelli, 1982) et le *Karolinska Sleepiness Scale* (KSS) (Åkerstedt et Gillberg, 1990). Dans cette thèse nous avons privilégié l'utilisation d'une échelle d'évaluation de la fatigue de type unidimensionnelle. Le choix précis de l'échelle choisi pour évaluer la fatigue ainsi que les critères utilisés pour réaliser ce choix sera décrit ultérieurement dans la thèse.

1.3 Approche systémique

1.3.1 Origine et évolution

Selon le dictionnaire Larousse, un système est défini comme « un ensemble d'éléments considérés dans leurs relations à l'intérieur d'un tout fonctionnant de manière unitaire » ou bien « un ensemble de procédés, de pratiques organisées, destinées à assurer une fonction définie ». Depuis la première moitié du XXe siècle, l'étude des systèmes a conduit au développement de ce qu'on appelle la pensée systémique ou l'approche de système, qui cherche à expliquer d'une façon logique la structure fondamentale et la nature des systèmes. Dans ce sens, l'Autrichien Ludwig Von Bertalanffy est considéré comme l'instigateur de la théorie générale des systèmes (TGS) et l'approche ou pensée de système (Van Assche et al., 2019). L'une des caractéristiques clé de l'approche de système est de considérer la situation où le domaine objet d'analyse d'un point de vue global, ce qui conduit au développement de concepts et de modèles pour des systèmes qui peuvent être de type naturel, socioculturel ou technique (Haines, 2010).

Dans l'analyse de la pensée systémique, la structure hiérarchique, les limites du système, les composants, l'interrelation et l'objectif sont quelques-uns des éléments qui doivent être pris en compte (Arnold et Wade, 2015). À titre d'exemple, un système de fabrication implique une série d'activités et d'opérations interdépendantes telles que la conception, l'approvisionnement des matériaux, la planification, la production manufacturière, l'assurance qualité, la gestion, le marketing et des activités consacrées à la transformation des matières premières en biens commercialisables (Wu, 2000).

Depuis le début des années 70, Cooper et Foster (1971) considéraient déjà les systèmes de production comme des systèmes sociotechniques (STS) qui impliquent la technologie (machines, agencement de l'usine, matières premières) et la structure des relations de travail qui relie les opérateurs humains à la technologie et entre eux. Mais, malgré cette reconnaissance, la vision des systèmes sociotechniques n'a pas toujours été privilégiée et mise en œuvre dans les systèmes de production et de fabrication. Par exemple, Shani et al. (1992) ont souligné la nécessité d'utiliser cette vision, qui va au-delà de la conception du travail pour englober des dimensions plus larges de la structure organisationnelle, lorsqu'on envisage la mise en œuvre de nouvelles technologies de fabrication. Avec les défis et les changements technologiques encore plus importants associés à l'industrie 4.0, la pensée systémique a été reconnue comme étant très pertinente (Oliveira et al., 2020). Un exemple qui illustre ceci est l'utilisation de FRAM (méthode systémique) pour l'analyse de risques liés à l'introduction d'un gant de données (*data glove*) pour supporter l'exécution des tâches d'assemblage (Nadeau et Mofidi, 2021). Les auteurs ont reconnu que l'approche systémique est appropriée pour l'analyse des risques dans des systèmes complexes manufacturiers, en particulier parce que cette approche permet une vision prospective pour la conception d'un assemblage 4.0.

1.3.2 L'approche systémique en sécurité et ergonomie

Au cours des dernières décennies, l'application de l'approche systémique a suscité un intérêt croissant dans le domaine de la sécurité industrielle, plus particulièrement lors de l'analyse des accidents dans des domaines critiques de la sécurité. Depuis la fin des années 1980 et le début

des années 1990, il était clair que l'analyse du comportement humain n'était pas suffisante pour comprendre les accidents et que l'attribution des causalités posait des défis importants (Dekker, 2017). Par exemple, Rasmussen (1990) a déclaré que « l'identification des erreurs comme une catégorie distincte de comportement devient de plus en plus difficile dans les environnements de travail modernes ». De manière semblable selon Reason (1990a), bien que les erreurs et les violations soient directement liées aux opérateurs " de première ligne ", ceux-ci sont rarement les principaux instigateurs des défaillances de systèmes sociotechniques complexes. C'est en fait, James Reason lui-même qui a développé le modèle du fromage suisse (Swiss Cheese Model-SCM), l'un des principaux antécédents théoriques de l'analyse systémique des accidents.

Le modèle du fromage suisse a été développé par Reason suite à d'importantes discussions théoriques menées au cours des années 80 à la suite de diverses recherches scientifiques et de projets industriels réalisés principalement dans le secteur nucléaire (Larouzee et le coze, 2020). L'idée principale du modèle est que les accidents dans les systèmes complexes sont causés par la concaténation de multiples facteurs ou causes. Chacun de ces facteurs peut être nécessaire, mais, pris isolément, ils ne sont pas suffisants pour produire l'accident. Le modèle du fromage suisse s'articule autour d'une approche systémique dans laquelle les actes dangereux commis par les travailleurs ne sont pas la cause, mais le résultat de divers facteurs contributifs au sein du système de travail (Reason et al., 2006).

Du point de vue de l'ergonomie et de la conception du système de travail, l'approche centrée sur le système reconnaît les erreurs comme des conséquences plutôt que des causes primaires (Reason, 2000 ; Stanton & Harvey, 2017). Les origines de l'erreur ne sont pas liées à la nature humaine, mais à des facteurs systémiques. Cette approche met également l'accent sur l'idée que les êtres humains ne sont pas infailibles et que des erreurs sont à prévoir, même dans les meilleures conditions. De cette manière, en abordant l'erreur humaine sous l'angle des systèmes, on reconnaît que l'opérateur est rarement la seule cause d'une erreur ou d'une défaillance. Selon Wiegmann et Shappell (2001), la performance humaine comprend un ensemble complexe d'interactions de différents facteurs et c'est sur ces facteurs que l'approche

systemique doit se concentrer. Par exemple, cette approche a été adoptée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) pour le traitement des facteurs humains dans l'enquête et l'analyse des accidents aériens. En fait, l'OACI a officiellement adopté le modèle de l'erreur de raisonnement (modèle du fromage suisse) comme modèle de référence pour ses États membres afin de faciliter la compréhension des facteurs humains dans la sécurité aérienne (ICAO, 1993).

À l'heure actuelle il est généralement admis la perspective selon laquelle les accidents sont vus en tant que phénomènes systémiques résultants de l'interconnexion entre de multiples facteurs contributifs à différents niveaux du système organisationnel (Carayon et al., 2015a; Fan et al., 2015; Hulme et al., 2019). Nonobstant, une récente revue de la littérature explorant l'état de la science en ce qui trait à l'analyse de l'erreur humaine a conclu que "bien qu'une contribution utile ait été apportée, nous devons dépasser la focalisation sur l'erreur individuelle pour comprendre et optimiser des systèmes entiers" (Read et al., 2021). Cela reconnaît que l'approche de système est toujours nécessaire afin de dépasser l'analyse de facteurs immédiats aux opérateurs. Malgré les efforts déployés, il faut encore pousser le changement de paradigme. Historiquement l'analyse et la recherche des causes des déficiences de la qualité ont eu tendance à s'appuyer davantage sur l'analyse statistique des données, une approche appartenant au domaine du contrôle de la qualité (Bajpai, 2018; Das, 2013). Néanmoins, l'approche de système commence à gagner de l'intérêt dans le domaine de la gestion de la qualité (Bashan et Kordova, 2021; Conti, 2010; Patel, 2016).

Nous soutenons dans cette thèse que les accidents dans les domaines critiques de la sécurité et les déficiences de qualité liée aux erreurs dans la fabrication partagent des origines systémiques similaires, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de cause unique, mais plutôt une série de facteurs contributifs au sein du système. De cette façon, l'analyse des erreurs d'assemblage en utilisant l'approche de système peut donner une vision plus holistique du système de fabrication.

1.3.3 Méthodes d'analyse systémique

L'adoption de la "vision systémique" a conduit à l'émergence de plusieurs méthodes d'analyse systémique des accidents. En général, ces méthodes sont relativement récentes. La méthode HFACS (*Human Factors Analysis and Classification System*), par exemple, est un système de classification ou taxonomie basée sur le modèle du fromage suisse (Shappell et Wiegmann, 2000c). L'objectif initial était d'améliorer le processus d'enquête et d'analyse des accidents aériens. Au-delà des actions dangereuses des opérateurs (erreurs et violations) HFACS définit plusieurs facteurs d'influence dans d'autres niveaux de l'organisation : conditions préalables aux actes dangereux, supervision inadéquate, les influences organisationnelles (Shappell et Wiegmann, 1997). Une autre méthode issue des travaux de Jens Rasmussen est connue comme AcciMap. Cette méthode a été développée dans le but de représenter graphiquement les multiples facteurs contribuant aux accidents ou aux événements indésirables et leurs interrelations à différents niveaux du système organisationnel (Rasmussen et Svedung, 2000). La méthode est basée sur l'abstraction fonctionnelle plutôt que sur la décomposition structurelle. Cela est une caractéristique commune aux méthodes d'analyse systémique qui les distinguent de méthodes dites classiques basées sur la décomposition de la structure du système ou de la structure des tâches comme l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) (Stamatis, 2003). Un nombre croissant de méthodes d'analyse systémique a été mis au point au cours de deux dernières décennies, notamment *Systems Theory Accident Modeling and Processes (STAMP)* (Leveson, 2004), *Functional Resonance Analysis Method (FRAM)* (Hollnagel, 2012) et plus récemment, *Event Analysis of Systemic Teamwork Broken Links (EAST-BL)* (Stanton et Harvey, 2017), and *Networked Hazard Analysis and Risk Management System (NET-HARMS)* (Dallat et al., 2018).

Dans une revue de la littérature de plusieurs de ces méthodes (AcciMap, STAMP, HFACS et FRAM) réalisée entre 1990 et 2018, les auteurs ont constaté que les contextes d'utilisation les plus courants étaient l'aviation, le maritime, le ferroviaire, la santé publique et les mines (Hulme et al., 2019). La fabrication ne semble pas être un contexte particulièrement intéressant jusqu'à présent pour l'application de ces méthodes considérées encore émergentes. Toutefois

(Mofidi et Nadeau, 2021) ont identifié que FRAM et STAMP ont été modestement utilisées dans l'analyse du système de fabrication. Dans leur revue de la littérature, les auteurs montrent que ces deux méthodes systémiques sont adaptées à la compréhension, à l'explication et à l'analyse des systèmes de fabrication complexes. Nous croyons alors que l'analyse des risques opérationnels dans la fabrication, par exemple les déficiences de qualité liées aux erreurs, pourrait bénéficier de l'approche et des méthodes de la pensée systémique. Le choix spécifique des méthodes systémiques utilisées dans cette thèse sera précisé ultérieurement.

1.4 Technologies numériques dans la manufacture

Certaines technologies de l'Industrie 4.0 sont pertinentes pour la performance humaine en contexte d'assemblage manuel complexe. Bien qu'aucune de ces technologies elles-mêmes ne fasse pas l'objet de la recherche présentée dans cette thèse, il a été jugé nécessaire d'aborder ces questions liées à la transformation numérique de la manufacture. Nous croyons que notre recherche constitue un préambule nécessaire au déploiement futur des technologies numériques. C'est ainsi que nous avons choisi de traiter le concept d'opérateur 4.0, et les technologies de la réalité augmentée et la robotique collaborative. Ces deux technologies ont été identifiées comme clés dans une analyse de la littérature effectuée dans le cadre de cette recherche (Torres et Nadeau, 2020b).

Un groupe important de technologies d'automatisation industrielle et numérisation de processus de fabrication gravitent autour du paradigme de l'Industrie 4.0. Très souvent ces technologies et concepts sous-jacents se chevauchent ce qui rend difficile de saisir la signification exacte du terme Industrie 4.0. Par exemple, selon Hermann et al. (2016), une compréhension généralement acceptée du terme n'existe pas et celui-ci est plutôt considéré comme une référence ou un concept « parapluie ». Nonobstant, il est de plus en plus accepté que nous entrons dans une nouvelle ère dans la production industrielle. Le changement est considéré comme « quatrième révolution industrielle ». En Allemagne, cela a été nommé Industrie 4.0 comme résultat d'une initiative stratégique du gouvernement allemand connue comme l'initiative allemande de l'Industrie 4.0. Cette initiative a été lancée en 2011 faisant partie du « *High Tech Strategy 2020 Action Plan* » (European Commission, 2017; GTAI,

2018). L'Industrie 4.0 représente surtout l'association entre le monde de la production et les réseaux de connectivité (compris dans l'internet des objets). Cette connectivité est au cœur même de l'industrie 4.0 (Drath et Horch, 2014; GTAI, 2018; Shrouf et al., 2014). Nous présenterons plus bas des éléments liés au concept d'Opérateur 4.0 et la description de deux technologies qui offrent un potentiel important d'augmenter la performance de travailleurs dans un contexte d'assemblage manuel complexe : la réalité augmentée et la robotique collaborative.

1.4.1 La conceptualisation de l'Opérateur 4.0

Un élément distinctif de l'Industrie 4.0 est le fait que celle-ci devra permettre une production de masse hautement personnalisée (*mass customization*, en anglais) ce qui entraînera une augmentation du nombre de variantes d'un même produit ainsi qu'une diminution de la taille des lots (Bragança et al., 2019). De cette manière, le niveau de complexité de l'assemblage manuel dans le contexte de la manufacture est aussi appelé à augmenter (Kong, 2019; Mattsson et al., 2018a).

Afin de répondre au besoin du travail humain dans la manufacture, de nouvelles technologies de support aux capacités humaines sont en développement. Selon Romero et al. (2016) ce support peut être fourni tant du point de vue des aspects physiques du travail comme du point de vue des aspects cognitifs. Par exemple, du point de vue physique, les CoBots (*Collaborative Robots*) et les exosquelettes peuvent être considérés comme deux technologies avec un potentiel important pour soutenir les humains dans des tâches physiquement exigeantes ou répétitives et de cette manière contribuer à la réduction de maladies professionnelles comme les troubles musculosquelettiques (TMS) (Bragança et al., 2019). De la même façon, plusieurs autres technologies peuvent soutenir l'humain dans des processus complexes de nature cognitive. Quelques auteurs parlent, par exemple, de « manufacture cognitive » pour faire référence à l'application de modèles cognitifs aux processus et systèmes de fabrication (Zhang, 2017). De plus, l'idée de « l'automatisation cognitive » est émergente dans l'assemblage manuel complexe. Celle-ci a été définie comme « l'ensemble de solutions techniques aidant

l'opérateur sur le COMMENT et QUOI assembler tout en offrant plus de contrôle sur les situations de travail », p. ex., des outils numériques, lunettes de réalité augmentée, des cobots (Mattsson et al., 2018a).

Selon Mayrhofer et al. (2019), les nouvelles technologies de l'industrie 4.0 offrent la possibilité de répondre aux besoins d'une main-d'œuvre de plus en plus diversifiée dans le processus d'assemblage complexe (Nadeau et al., 2022). De cette manière, l'utilisation de ces nouvelles technologies afin de soutenir l'humain au travail et d'augmenter le niveau d'adaptation voire de personnalisation du système de travail a ouvert la porte à la conceptualisation de l'Opérateur 4.0 (Mattsson et al., 2018a; Peruzzini et al., 2018; Romero et al., 2018; Romero et al., 2016). L'Opérateur 4.0 a été formellement défini par Romero et al. (2016) comme « un opérateur intelligent et compétent qui effectue non seulement un travail coopératif avec des robots, mais aussi un travail assisté par des machines, en fonction des besoins et au moyen de systèmes cyberphysiques humains (...) ». Les aspects cognitifs liés à la conceptualisation de l'Opérateur 4.0 sont discutés dans l'article « The Cognitive Operator 4.0 » (Thorvald et al., 2021). Cet article s'intéresse notamment aux éléments cognitifs associés à l'interaction de différentes technologies avec lesquels l'humain devra interagir.

Dans la conceptualisation de l'Opérateur 4.0, il a deux éléments clés. D'abord l'introduction de la collaboration comme nouvelle approche d'interaction entre les humains et les équipements et deuxièmement l'utilisation de technologies qui assisteront le travailleur dans l'exécution de leurs tâches. Une récente revue de la littérature basée sur 1469 références provenant d'INSPEC et Compendex a identifié trois principaux axes de recherche associés à l'Industrie 4.0 et les technologies de support à l'humain : (1) développement de l'infrastructure technologique nécessaire (2) la performance des travailleurs ainsi que (3) l'adoption et l'intégration de ces nouvelles technologies dans le contexte manufacturier (Torres et Nadeau, 2020b). En plus, cette revue a aussi montré que même si plusieurs technologies gravitent autour du concept d'Opérateur 4.0, il y a deux technologies qui se distinguent particulièrement: la réalité augmentée et la collaboration humain-robot. Pour cette raison, nous allons nous intéresser dans les prochaines sections à ces deux technologies, et le potentiel qu'elles offrent

dans un contexte d'assemblage manuel complexe. D'autres technologies qui gravitent autour de l'Opérateur 4.0 sont, par exemple, les exosquelettes (Davis et al., 2020) et le suivi d'indicateurs physiologiques qui se fait généralement sous forme de *wearables* (LeFloch et al., 2018; Zhang et al., 2022). Les gants intelligents (data gloves) sont un exemple d'un type de *wearables* qui offre du potentiel dans l'assemblage manuel (Naeini et Nadeau, 2022).

1.4.2 La réalité augmentée

La réalité virtuelle et la réalité augmentée sont deux technologies qui promettent de supporter l'humain dans les aspects cognitifs de leurs tâches. Dans un contexte manufacturier, la réalité virtuelle peut être utilisée pour la simulation, l'analyse et l'optimisation du processus d'assemblage, mais c'est surtout dans la formation de travailleurs que la réalité virtuelle a trouvé les applications les plus prometteuses. Dans une récente revue de la littérature, la réalité virtuelle a été identifiée comme une alternative actuelle et future pour la formation efficace des ressources humaines dans le domaine industriel (Naranjo et al., 2020). Un avantage de la réalité virtuelle par rapport à la simulation classique basée sur des systèmes CAD est la possibilité de manipuler de caméras (déplacement du centre visuel dans l'espace) et augmenter l'expérience 3D en termes de degrés de liberté (DOFs, en anglais) ce qui permet une meilleure navigation intuitive dans l'environnement virtuel (Gallegos-Nieto et al., 2014; Xia et al., 2013).

Nonobstant, dans le cas plus particulier de la manufacture et de l'assemblage manuel, c'est la réalité augmentée qui offre le potentiel de soutenir les travailleurs dans l'exécution des tâches d'assemblage complexe. Dans ce sens, le développement des instructions de travail basées sur la réalité augmentée permet d'accroître le réalisme et la capacité d'interactions des travailleurs avec les instructions d'assemblage ce qui, à son tour, peut influencer positivement la performance (Lai et al., 2020; Vanneste et al., 2020). Plusieurs moyens de diffusion des instructions de travail en utilisant la réalité augmentée existent tels que les dispositifs mobiles portables (p. ex., tablette, téléphone intelligent), réalité augmentée indirecte (montrer la scène augmentée sur un moniteur), ou casque de réalité augmentée (Alves et al., 2021; Nadeau et al., 2021). Il existe également la réalité augmentée basée sur la projection de lumière sur l'espace

de travail et des modèles 3D projetés (aussi appelé *digital twins*) en utilisant divers moyens (Ojer et al., 2020).

En règle générale, l'utilisation de la réalité augmentée dans l'assemblage manuel va au-delà d'une simple amélioration du réalisme ou des interactions avec les instructions. Très souvent, la réalité augmentée est intégrée dans un système plus complet qui aide les travailleurs à naviguer à travers les différentes étapes de l'exécution de la tâche. Ce type de système est appelé « systèmes d'assistance informationnelle pour l'assemblage manuel » et peuvent comprendre plusieurs domaines d'assistance parmi lesquelles : instructions d'assemblage, reconnaissance de la progression de l'assemblage, contrôle de la qualité de l'assemblage, configuration et étalonnage automatiques entre autres (Petzoldt et al., 2020). Ces systèmes vont allier vision par ordinateur et réalité augmentée à l'intelligence humaine. De cette manière un tel système guide et valide l'exécution appropriée des étapes d'assemblage.

L'utilisation des outils intelligents est un autre élément que l'on retrouve fréquemment lié à ces systèmes. Cela comprend, par exemple, des clés dynamométriques intelligentes et sans fils capable d'améliorer la fiabilité de l'application de forces (en donnant un suivi de l'évolution du moment de serrage) lors du serrage de boulons et autres composants de fixation (Brands, 2018). Des outils à l'épreuve des erreurs ont été utilisés avec succès dans l'assemblage depuis la fin des années 80, lorsque des outils électriques équipés de capteurs électroniques pour contrôler l'application de moments sont devenus disponibles (Camillo, 2010). L'intelligence artificielle et la vision par ordinateur ont poussé davantage le potentiel de ces systèmes de prévention contre les erreurs.

Parallèlement, différentes configurations de systèmes d'assistance informationnelle basée sur les réalités augmentées sont disponibles. Par exemple, Microsoft propose HoloLens 2, est un casque à réalité mixte spécialement conçu pour les travailleurs d'usine. Le système peut suivre, en temps réel, ce que le travailleur fait à l'aide des capteurs Azure Kinect, le système de caméras Microsoft peut scanner le contexte pour détecter des objets réels. Un ensemble d'instructions holographiques peut alors être affiché à l'opérateur en fonction des différentes

étapes du processus d'assemblage. Cependant, l'utilisation de ce type de configuration basée sur des casques pose encore de sérieux défis en termes de confort ainsi que d'autres aspects comme le champ de vision. (Bohn, 2019). Par exemple, le port du casque pendant toute la durée du quart de travail pourrait être perçu comme inconfortable par les travailleurs.

Une autre configuration prometteuse est le Light Guide System (LGS). Dans ce cas, en utilisant la vision par ordinateur, les caméras aériennes peuvent détecter ce que l'assembleur réalise et les instructions peuvent alors être projetées directement sur l'espace de travail ou sur l'objet à assembler en utilisant des projecteurs à haute intensité. Mayrhofer et al. (2019) propose un tel système développé pour l'assemblage des ailes d'avions. Cette configuration présente l'avantage que l'assembleur n'a pas besoin de porter de casque de réalité mixte, mais il est nécessaire que les travailleurs restent la plupart du temps dans le même espace de travail puisque le système est fixe. Ce système pourrait aussi être plus confortable d'un point de vue visuel. Cependant, un système de guidage de l'assemblage basé sur la technologie LGS peut avoir certaines limitations, en particulier lors de la transposition des instructions sur l'objet d'assemblage si ceci a une forme cylindrique, sphérique ou irrégulière. Le système LGS peut indiquer la position d'une pièce à installer sur des surfaces 2D, mais lorsque différentes orientations sont possibles, il peut être difficile de projeter l'orientation exacte de la pièce dans l'espace. C'est un inconvénient important, car dans l'assemblage manuel complexe on veut éviter les erreurs liées à la géométrie de l'assemblage.

Selon Alves et al. (2021) il n'existe pas une configuration unique afin d'utiliser la réalité augmentée comme méthode de visualisation des instructions d'assemblage. Le choix dépend des capacités et limites offertes par les méthodes existantes : le niveau de confort, le type d'interaction fournie, le prix de l'équipement ainsi que la complexité et la quantité d'instructions d'assemblage visées, entre autres. En plus, il serait judicieux, avant même de choisir le système ou la technologie de support de l'assemblage, de gagner en compréhension sur les caractéristiques associées à l'exécution de la tâche par le travailleur. Plusieurs questions doivent être répondues afin de gagner en clarté sur l'introduction de cette nouvelle technologie:

- 1) Quels aspects des tâches doivent être supportés/automatisés?
- 2) Quelle stratégie

d'adaptation utiliser? 3) Quel sera le degré de contrôle que l'humain aura sur l'automatisation? En fin de compte, il n'est pas judicieux d'automatiser ou de rendre intelligent des processus que l'on ne comprend pas ou ne maîtrise pas bien et pour lesquels il manque une stratégie claire.

1.4.3 La robotique collaborative

Les robots collaboratifs, bien que plus centrés sur le fait de libérer le travailleur des exigences physiques de la tâche, ont comme principe de fonctionnement l'intégration même de certains éléments de nature cognitive. D'après Bragança et al. (2019) l'utilisation de robots collaboratifs permettra d'améliorer l'efficacité des systèmes de production en aidant les travailleurs dans leurs tâches tant physiques que cognitives. Un domaine où la robotique collaborative peut être particulièrement intéressante c'est l'inspection de la qualité nécessaire dans tout processus d'assemblage. Historiquement, les travailleurs ont effectué ces inspections en utilisant le sens de la vue. Cependant, plusieurs limites du système visuel chez les humains ont été reconnues dans la littérature (Drury et Fox, 1975; Jebaraj et al., 1999) et pour cette raison, l'inspection visuelle automatisée est fréquemment utilisée pour le contrôle et la surveillance de la qualité dans l'industrie manufacturière (Konig et al., 1995; Suresh et al., 1983). Par exemple, un robot peut prendre des photos du produit final pour détecter les déviations et les non-conformités. Un tel système peut valider la qualité de l'assemblage final en se basant sur sa capacité à effectuer une reconnaissance optique des caractéristiques, par exemple en détectant si un composant spécifique est absent. Nonobstant, il serait plus flexible de pouvoir réaliser l'inspection visuelle automatisée avant même que le produit quitte le poste de travail. Dans ce sens, l'utilisation des robots collaboratifs pour l'inspection visuelle automatisée réalisée directement sur le poste d'assemblage est une perspective en cours d'exploration (Leidenkrantz et Westbrandt, 2019; Makrini et al., 2017).

De manière générale, les interactions entre les cobots et les humains peuvent être considérées comme un partenariat où le travail est partagé en mode collaboratif (Djuric et al., 2016), ce qui demande du développement d'algorithmes efficaces visant l'évitement des collisions entre

l'humain et le robot (Scimmi et al., 2021). Le robot (ou plutôt le système) doit être capable de reconnaître ce que l'humain est en train de faire, ou plus important encore, ce qu'il va faire ainsi que l'espace qu'il occupera dans un avenir proche. Cela permettrait d'éviter toute confusion, tout conflit, voire toute collision. Et par conséquent, le robot doit avoir un comportement qui peut être prédictif pour l'utilisateur humain afin d'éviter les conflits dans l'espace de travail partagé (Chadalavada et al., 2015).

C'est pourquoi, derrière la robotique collaborative, il existe des algorithmes capables d'apprendre et de s'adapter au contexte de travailleur. Les CoBots ont alors un aspect cognitif au-delà de l'action physique que ceux-ci vont exécuter. Ils sont « context-aware », et sont capables de réagir aux changements dans l'environnement de travail. Le robot et l'humain travaillent alors sur le même produit à partir d'une allocation partagée des tâches, ce qui implique une certaine forme de communication entre les deux (Chadalavada et al., 2015). Il a été soutenu qu'une collaboration harmonieuse entre le travailleur et le robot nécessite de doter ceux-ci de capacités cognitives qui leur permettent de prendre conscience de l'environnement et des actions qui se déroulent à l'intérieur de l'espace de travail d'assemblage (Dimitropoulos et al., 2021).

L'interaction homme-robot peut également présenter certains risques si les facteurs humains ne sont pas pris en compte tout au long du processus (Bragança et al., 2019). Dans ce sens, comme plusieurs autres technologies de soutien aux travailleurs, il est nécessaire de regarder au-delà de la technologie elle-même et de se questionner sur plusieurs autres aspects. Nous décrirons ci-après certains défis liés à l'intégration technologique dans un contexte d'industrie 4.0.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre est consacré à la description de la méthodologie de recherche adoptée dans cette thèse. On montre la logique et les étapes suivies pour atteindre les objectifs de recherche. Pour cela nous avons utilisé les règles épistémologiques du domaine d'étude. Le chapitre est divisé en quatre sections. Dans la première section (2.1) nous avons défini la problématique et les objectifs de recherche de la thèse ce qui sert comme point de départ du chapitre. La deuxième section (2.2) traite de la méthodologie globale de la thèse et montre comment celle-ci suit une approche de type mixte impliquant l'utilisation des méthodes de natures variées. Cette approche méthodologique répond à un paradigme de recherche de type pragmatique qui cherche particulièrement l'acquisition des connaissances utiles. Nous aborderons également pourquoi cette recherche utilise la méthode d'étude de cas, et ce, même si certains éléments de recherche-action sont présents. Postérieurement dans la section 2.3 nous expliquerons la démarche de recherche qui a été déployée et les étapes qui la composent. Cette démarche est divisée en deux : un cadre théorique (conception) et un cadre pratique (exécution). Nous montrons également les trois sous projets qui composent le projet global de recherche : (1) analyse de la fiabilité humaine (2) étude de la fatigue et de la charge de travail et (3) analyse avec approches systémiques. Finalement, dans la section 2.4, nous faisons le bilan des méthodes de collecte et d'analyse de données qui ont été utilisées tout au long de la recherche.

2.1 Problématique de recherche et objectifs

Les erreurs d'assemblage représentent une problématique qui affecte la qualité de la production et qui engendre des coûts économiques importants et potentiellement des risques pour la sécurité des produits aéronautiques. Malgré cela, l'étude des facteurs de risque associés à l'erreur humaine dans l'assemblage manuel complexe est sous-représentée dans la littérature en ergonomie. La plupart des études sur la fiabilité humaine se sont principalement concentrées sur les secteurs critiques pour la sécurité et très peu sur le secteur manufacturier. De manière

semblable, la charge mentale et la fatigue, deux facteurs médiateurs de l'erreur exerçant une influence importante sur la performance humaine, ont été relativement peu étudiées dans le domaine de la manufacture. Cela contraste avec un nombre important d'études traitant des problématiques de travail physique dans le contexte manufacturier (travail répétitif, manutention manuelle de charges, fatigue musculaire, postures contraignantes). Notre partenaire industriel, une entreprise de fabrication dans le secteur de l'aéronautique, souhaite établir une stratégie pour réduire les erreurs et améliorer la qualité dans ses installations. À cette fin, l'entreprise cherche à réaliser une analyse du système d'assemblage du point de vue de l'ergonomie. Pour ce faire, l'utilisation d'une approche de système en incluant des facteurs organisationnels au-delà de ceux immédiats au lieu de travail peut bonifier l'analyse. Cependant, l'analyse des erreurs dans l'assemblage manuel complexe en utilisant des méthodes d'analyse systémique n'a pas été jusqu'à présent traité dans la littérature.

2.1.1 Objectif général

L'objectif principal de la thèse est de comprendre comment certains facteurs tant de nature ergonomique (conception du poste et environnement de travail) comme de nature organisationnelle (conception et gestion du système d'assemblage) exercent une influence sur le risque d'erreurs lors de l'exécution des tâches d'assemblage manuel complexe afin d'identifier des pistes d'améliorations et contribuer ainsi à une prévention durable des erreurs d'assemblage.

2.1.2 Objectifs spécifiques

1. Identifier les différents types d'erreurs possibles lors de la réalisation de tâches d'assemblage manuel complexe et évaluer le risque associé à ceux-ci et l'influence de différents facteurs contributifs immédiats au poste de travail.

2. Évaluer comment les travailleurs qui exécutent de l'assemblage manuel complexe perçoivent le niveau de fatigue et de charge de travail et identifier quels facteurs, dont certains liés à la gestion de la production, exercent une influence sur ce dernier.
3. Réaliser une analyse des facteurs organisationnels qui exercent une possible influence sur les erreurs d'assemblage en utilisant une approche de système afin de permettre d'avoir une vision holistique de la problématique en question.

2.2 Fondements et choix de la méthodologie de la thèse

En raison des caractéristiques et du contexte de notre recherche, l'approche méthodologique qui a été jugée le plus appropriée et qui a été choisie c'est la « recherche par méthode mixte ». Cette approche méthodologique nous permet d'explorer des perspectives variées en lien avec des questions de recherche multidimensionnelles (Shorten et Smith, 2017). Selon Johnson et al. (2007) nous vivons actuellement dans un monde où il existe trois approches méthodologiques de recherche, qui prospèrent et coexistent : quantitatif, qualitatif et mixte. Nonobstant, les approches qualitatives et quantitatives ne devraient pas être considérées comme des catégories rigides et distinctes ou des pôles opposés, mais plutôt des extrémités dans un continuum (Creswell et Creswell, 2017). De cette manière, la recherche par méthodes mixtes se situe au milieu de ce continuum en incorporant des éléments des approches qualitatives et quantitatives. Nous croyons que l'étude de l'erreur humaine dans un contexte de manufacture aéronautique complexe mérite l'utilisation des méthodes de nature variées. Johnson et al. (2007) remarquent qu'un « monde méthodologique à trois approches méthodologiques pourrait être sain, car chaque approche a ses forces et ses faiblesses ainsi que ses moments et ses lieux de nécessité ». Ainsi, la recherche qui se fait en utilisant des méthodes mixtes peut tirer partie des atouts potentiels des méthodes qualitatives et quantitatives. Pour ce qui est de la discipline de l'ergonomie, Carayon et al. (2015b) font valoir que la réalisation des recherches sur le terrain avec des méthodes multiples et mixtes permettrait à la recherche en ergonomie d'avoir plus d'impact et d'augmenter sa pertinence. Ainsi, dans notre cas, une méthodologie de recherche de type mixte permettrait d'explorer d'une façon plus ample et de

différents points de vue les problématiques de qualité liées à l'erreur humaine en contexte d'assemblage complexe.

Du point de vue épistémologique, notre recherche répond à un paradigme de type pragmatique. En effet, il a été reconnu que la recherche par méthodes mixtes est basée sur le pragmatisme comme fondement philosophique (Allmark et Machaczek, 2018; Morgan, 2007). D'autres paradigmes de recherche sont le positivisme, le constructivisme et le réalisme (Riege, 2003). Selon Feilzer (2010) « le pragmatisme en tant que paradigme de recherche soutient l'utilisation d'un mélange de différentes méthodes de recherche ainsi que de modes d'analyse et d'un cycle continu de raisonnement abductif, tout en étant guidé principalement par le désir du chercheur de produire des connaissances socialement utiles ». Le raisonnement abductif est un type de raisonnement qui va et vient entre l'induction et la déduction (Morgan, 2007). Dans un paradigme pragmatique, le but de la recherche n'est pas l'acquisition de connaissances 'vraies' dans un sens abstrait, mais plutôt l'acquisition de connaissances utiles (Allmark et Machaczek, 2018). De cette manière, le pragmatisme place l'activité humaine intentionnelle au cœur de la philosophie et de la science en commençant toujours par un problème pratique qui devra être résolu. Il faut souligner que dans un paradigme de recherche pragmatique, la connaissance n'est pas une image exacte de la réalité, mais plutôt ce qui est convenable d'accepter comme réalité compte tenu de nos fins (Thayer, 1982).

Du point de vue conceptuel, la recherche par méthode mixte est définie comme « le type de recherche dans laquelle un chercheur (euse) ou une équipe de chercheurs (euse) combine des éléments d'approches de recherche qualitatives et quantitatives dans le but général d'élargir et d'approfondir la compréhension et la corroboration » (Johnson et al., 2007). La recherche par méthodes mixtes exige l'utilisation de diverses méthodes dans la collecte des données, l'analyse des données et l'interprétation des démonstrations (Shorten et Smith, 2017). Le principal avantage de l'utilisation d'une approche mixte consiste à permettre aux chercheurs (euses) d'avoir une vision plus panoramique de l'objet et du contexte de recherche. Pour cela les phénomènes sont considérés de différents points de vue et à travers diverses optiques de

recherche. De cette manière, la recherche mixte peut offrir une image plus complète et une meilleure compréhension de l'objet d'étude ainsi que permettre la triangulation des résultats. Dans notre recherche, nous utilisons des méthodes de natures variées, qui comprennent des méthodes empiriques qualitatives (observation, entrevue, groupe focal), méthodes empiriques quantitatives (questionnaires, statistique inférentiel, statistique descriptive) et des méthodes analytiques (méthode d'analyse systémique). Ces derniers impliquent la modélisation des interactions entre les éléments qui composent l'objet de recherche (1990).

Dans cette thèse, nous réalisons la recherche dans un contexte défini et sur une période de temps donnée. Dans ce sens, notre recherche constitue une étude de cas en ce qu'elle permet d'analyser un problème spécifique dans un contexte bien défini. La réalisation du projet de recherche au cœur de cette thèse a comme point de départ une demande initiale réalisée par un partenaire industriel provenant de l'industrie aéronautique. De cette façon, la recherche est soumise à une composante pratique importante et est ainsi contrainte de répondre à certaines questions concrètes du terrain.

2.2.1 Des phénomènes complexes en situation réelle: l'étude de cas

Il n'existe pas une définition unique de la recherche par étude de cas, mais celle-ci peut être décrite simplement comme « une investigation intensive et systématique d'un individu, d'un groupe, d'une communauté ou d'une autre unité, dans laquelle le chercheur examine des données approfondies relatives à plusieurs variables » (Heale et Twycross, 2018). La recherche par étude de cas se concentre sur quelques cas, souvent un seul cas, mais de manière très approfondie (Gomm et al., 2000). Cette méthodologie est l'un de principaux moyens par lesquels la recherche est menée dans les sciences sociales (Thomas, 2011), bien qu'elle soit aussi utilisée dans d'autres domaines comme les sciences de la vie (Heale et Twycross, 2018). Dans le cas de l'ergonomie, l'étude de cas est fréquemment utilisée comme méthodologie de recherche, en particulier lorsque cette recherche est réalisée en contexte réel de travail. En fait, si l'on tient compte que l'ergonomie est une discipline socialement située,

l'étude de cas en tant que méthodologie, peut offrir un aperçu pertinent sur la nature des interactions entre les humains et la technologie (Hancock et Szalma, 2004; Hignett et Wilson, 2004). Selon Gomm et al. (2000) ce qui différencie l'étude de cas de la recherche expérimentale n'est pas tant la quantité de données recueillies, mais plutôt le fait que cette dernière implique un contrôle direct des variables. En d'autres termes : « Dans les expériences, le chercheur 'crée' le cas étudié tandis que dans la recherche par étude de cas, le chercheur construit le cas à partir de l'occurrence naturelle des situations sociales ».

En règle générale, l'étude de cas ne cherche pas à étudier une organisation au complet, mais se concentre plutôt sur des problématiques ponctuelles associées à un domaine d'intérêt spécifique (Noor, 2008). La recherche réalisée dans cette thèse se concentre sur les problématiques de qualité liées à l'erreur humaine dans l'assemblage manuel complexe. La recherche est réalisée dans le domaine de la manufacture aérospatiale, plus précisément, dans une usine de production de moteurs d'avion appartenant à une société multinationale. La motivation est le désir d'améliorer la qualité dans la production de moteurs d'avions, et d'y parvenir en examinant le processus d'assemblage manuel et en recommandant des améliorations.

2.2.2 L'orientation pratique de la recherche

Les travaux présentés dans cette thèse se situent dans un cadre industriel précis : les facteurs contributifs à l'erreur humaine (sources de problèmes de qualité) dans l'assemblage de moteurs d'avions. Cette recherche débute à partir d'une demande réalisée par une entreprise manufacturière aéronautique qui est devenue le partenaire industriel de la recherche. De cette manière, l'implication du partenaire a été présente dès le début de notre projet de recherche ce qui a assuré un étroit lien entre l'équipe de recherche et le milieu objet d'étude. Cela a été possible, en particulier, à travers deux stages de recherche chez le partenaire industriel totalisant 12 mois. Pendant ce temps l'étudiant au doctorat a eu accès direct aux installations de production et à de sources de données primaires. L'interaction avec divers acteurs du milieu a été ainsi possible (gestionnaires de qualité, spécialistes de qualité, gestionnaires de

production, superviseurs de ligne d'assemblage, travailleurs, etc.). Compte tenu de ce qui précède, bien que notre projet utilise comme méthodologie de recherche primaire l'étude de cas, il comprend également certains éléments de recherche-action.

La recherche-action est aussi appelée recherche-intervention pour souligner le fait que ce type de recherche vise à identifier les problèmes du milieu objet d'étude et à trouver des solutions aux problèmes observés. Nonobstant, selon (Reason, 2003) la recherche-action est une « orientation » de la recherche plutôt qu'une méthodologie. Un élément crucial de la recherche-action est que le/la chercheur (euse) participe aux actions d'une organisation tout en réfléchissant aux efforts déployés pour promouvoir l'apprentissage tant pour l'organisation que pour les chercheurs (euses) (Village et al., 2014). De cette manière la recherche-action peut aider l'organisation impliquée à se familiariser avec les facteurs humains et l'ergonomie ainsi qu'à envisager leur intégration dans la stratégie de gestion de la qualité. Dans notre cas, le rôle de l'équipe de recherche a été beaucoup plus axé sur l'accompagnement du partenaire industriel. Bien que nous ayons eu une participation directe dans le milieu d'étude, nous n'avons pas enclenché un processus de réflexion sur le processus menant à la mise en place des solutions.

2.3 La démarche de recherche et ces étapes

La Figure 2.1 montre la démarche méthodologique de la thèse et les 10 étapes qui la composent. La démarche méthodologique est divisée en deux cadres : le cadre théorique et le cadre pratique. Le cadre théorique permet de situer la problématique de recherche et les besoins du partenaire industriel à la lumière de la littérature scientifique pertinente. De cette manière, le choix méthodologique, y compris les méthodes de collecte et d'analyse de données, est défini dans la dernière étape du cadre théorique (étape No. 5). Le cadre pratique comprend les étapes nécessaires afin de déployer la méthodologie choisie. Ces étapes commencent par une délimitation claire de l'objet d'étude pour ainsi passer à la collecte et l'analyse de données (étapes 7 et 8). On finalise le cadre pratique par la modélisation du système d'assemblage. Le

point culminant de la thèse se manifeste dans les conclusions et recommandations. C'est alors dans l'étape No 10 qui résume les éléments clés en termes de progrès de la science dans le domaine d'étude ainsi que les recommandations les plus pratiques.

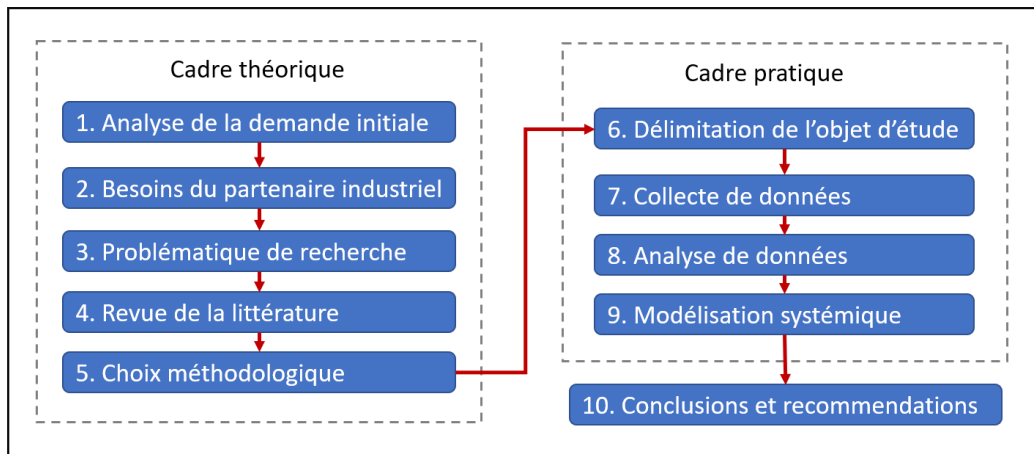


Figure 2.1 Démarche méthodologique de la thèse

Globalement la recherche contenue dans cette thèse est divisée en trois sous-projets majeurs qui coïncident avec les trois articles de revue avec comité de pairs (RAC). La figure 2.2 montre les trois sous-projets en question. La description de la méthodologie spécifique utilisée dans chaque sous-projet est présentée dans les chapitres 3-5 consacrés aux résultats de la thèse présentés sous forme d'articles de RAC.

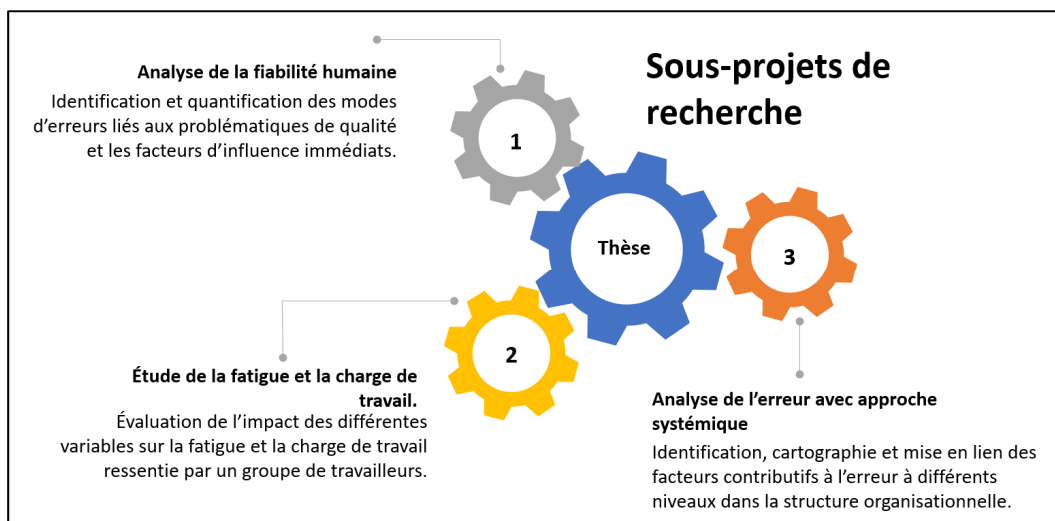


Figure 2.2 Les trois principaux sous-projets de la thèse

À part les trois sous-projets de la thèse, nous avons réalisé également certaines études d'une ampleur moindre qui ont servi comme complément au projet de recherche. Nous avons fait, par exemple, une revue de la littérature afin d'identifier les principales technologies de soutien 4.0 en lien à la manufacture et l'assemblage manuel complexe. Cela nous a aidé dans la réflexion au sujet des alternatives technologiques existantes afin de prévenir l'erreur et d'augmenter la performance humaine. Nous avons identifié, par exemple, la réalité augmentée et la robotique collaborative comme les technologies qui attirent présentement le plus l'attention des chercheurs (euses) au sujet des technologies 4.0 de soutien à l'humain en contexte de manufacture et plus précisément l'assemblage manuel (Torres et Nadeau, 2020b). Parallèlement à l'étude de la fatigue et de la charge de travail, nous avons évalué aussi l'impact potentiel des horaires de travail sur la fatigue en utilisant le modèle mathématique Fatigue Index (Torres et al., 2021d). Pour le calcul, nous avons identifié différents scénarios de semaines de travail à partir du registre des heures de travail et des entrevues avec les superviseurs de ligne d'assemblage. Plus de détails sont fournis dans l'article consacré à ce sujet (Torres et al., 2021d). Finalement, une analyse avec la méthode systémique HFACS est venue compléter l'analyse réalisée avec AcciMap et STAMP (Torres et al., 2022a).

2.4 La recherche avec sujets humains : implications éthiques

Dans le domaine de l'ergonomie/génie de facteurs humains (HF/E) il est fréquent que la recherche qui se fait, soit sur le terrain soit au laboratoire, demande la participation de sujets humains. Pour cette raison, des aspects d'éthique de la recherche sont importants dans les études en HF/E (Corlett, 2000; Yokoi, 2013). Les responsabilités éthiques ne sont pas circonscrites à la recherche en génie de facteurs humains. Les praticiens doivent également respecter les principes de l'éthique, car très souvent, le travailleur est au centre de leurs démarches d'amélioration du système de travail (Moroney, 1994). Dans notre recherche la participation des travailleurs a pris forme sous deux angles : participation indirecte et participation directe. Le premier cas correspond au fait que la compréhension du système de travail et son contexte demandent l'interaction avec les travailleurs. Cette interaction a pris

plusieurs formes dont l'observation générale, sur le terrain, observation détaillée de tâches et des entrevues non structurées. L'observation du travail réel sur le terrain a été alors un complément important à l'analyse des procédures de travail. Dans le cas de la participation directe, celle-ci a été manifeste dans le sous-projet No.2 où les travailleurs ont rempli plusieurs questionnaires et plusieurs données ont été recueillies. Tout cela afin de réaliser les analyses statistiques nécessaires. Tant dans le sous-projet No. 1 que dans le sous-projet No. 2, nous avons demandé et obtenu l'aval du Comité d'éthique de la recherche de l'École de technologie supérieure. Les deux certificats sont présentés en Annexe II et Annexe III respectivement.

2.5 Les méthodes de collecte et d'analyse de données

Notre démarche de recherche comprend la collecte de données provenant de sources d'informations multiples, et en utilisant différentes méthodes de collecte : l'observation systématique sur le terrain, l'entretien avec diverses parties prenantes, le sondage par questionnaires, la recherche dans les registres de données de l'entreprise, la révision de la documentation et du contenu des instructions de travail, entre autres. Lors de l'analyse, nous avons utilisé notamment, les statistiques descriptives et inférentielles, des techniques d'analyse de fiabilité humaine, des méthodes d'analyse systémique, entre autres. La Figure 2.3 montre de façon schématique les principales méthodes utilisées dans chacun des sous-projets de la thèse. Les méthodes sont regroupées selon leurs natures : empiriques qualitatives, empiriques quantitatives et analytiques. La Figure 2.3 n'est pas exhaustive et est présentée afin de fournir une vision globale des principales méthodes utilisées dans la recherche. Plus de détails sur les méthodes utilisées dans cette recherche sont présentés dans le Tableau 4. Ceci est fourni à titre de répertoire des méthodes où l'on décrit brièvement chaque méthode en termes de son utilisation et ce qui était visé par leur sélection. Plus de détails sur chaque méthode ainsi que les références dans la littérature peuvent se trouver dans chacun des chapitres de résultats.

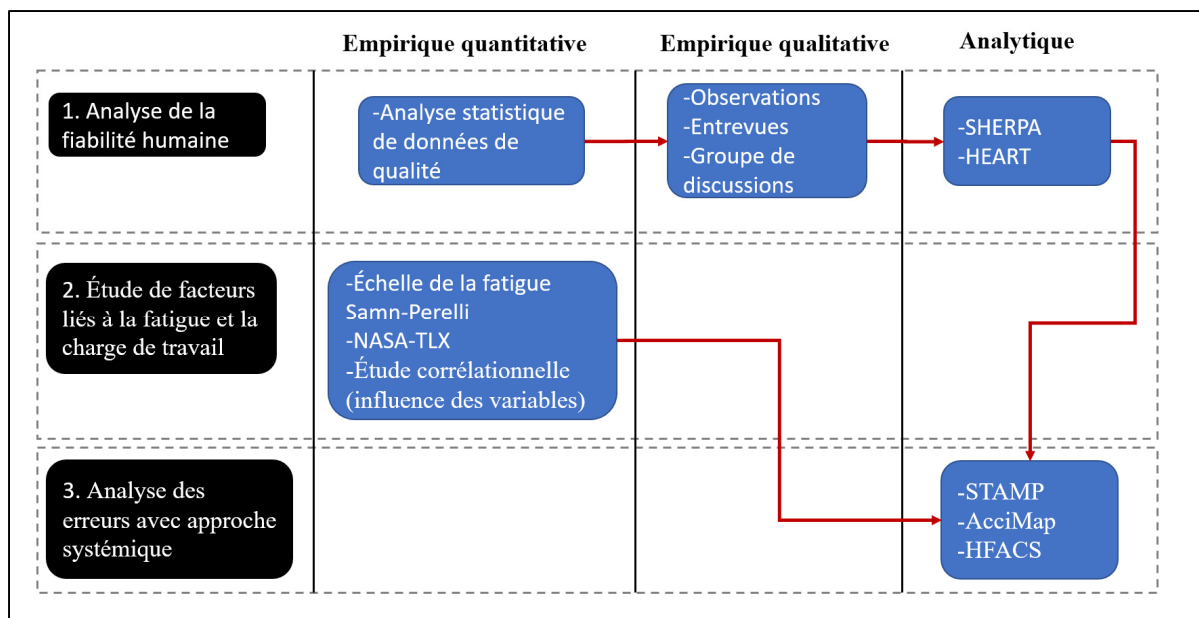


Figure 2.3. Principales méthodes utilisées en fonction de leur nature et du sous-projet correspondant

Dans le Tableau 2.1 nous montrons le répertoire des méthodes qui ont été utilisées dans la recherche. Nous faisons une brève description de leurs utilisations et l'objectif sous-jacent.

Tableau 2.1 Répertoire des méthodes utilisées dans la recherche présentée dans cette thèse

Méthode	Description/Utilisation	Objective
1. Observation sur le terrain.	Observation systématique de cinq postes d'assemblage final (40h).	Mieux comprendre l'exécution des tâches en contexte réel.
	Observations globales réalisées sur le plancher (walk through)	Comprendre la dynamique du processus de production/assemblage.
2. Entrevues	Entrevues non structurées réalisées avec travailleurs lors de l'observation sur le terrain.	Obtenir de l'information sur l'exécution des tâches d'assemblage. Mieux comprendre les tâches.
	Entrevues non structurées réalisées avec superviseurs, spécialistes de qualité et autres acteurs concernés.	Obtenir de l'information sur des éléments de gestion et supervision du processus de manufacture/assemblage.
3. Groupe de discussion	Rencontres avec plusieurs parties prenantes (travailleurs, spécialistes et gestionnaires de qualité, superviseurs de production).	Échanger/valider le choix d'outils d'analyse, l'orientation de la recherche et les résultats du projet.

Tableau 2.1 Répertoire des méthodes utilisées dans la recherche présentée dans cette thèse
(suite)

Méthode	Description/Utilisation	Objective
4. Recherche dans les registres et base de données	Recherche dans le registre de données de qualité pour une période de 36 mois.	Identifier les données de qualité pertinentes pour l'analyse statistique.
	Recherche dans le système informatique de manufacture (Manufacturing Execution System).	Explorer et se familiariser avec les procédures de travail établies.
	Recherche dans le registre des heures de travail assignées aux travailleurs.	Identifier plusieurs configurations de semaines de travail.
5. Analyse statistique descriptive.	Calcul de taux de problèmes de qualité selon plusieurs critères : ligne d'assemblage, poste de travail, pièces concernées. Fait à partir des registres de qualité de l'entreprise.	Délimiter l'objet d'étude. Comparer les différentes lignes d'assemblage. Choisir la ligne, les postes de travail et les pièces critiques.
6. NASA-TLX	Évaluation de la charge de travail perçue et ces six composantes (évalué par les travailleurs sous forme d'échelle).	Collecte de données auprès de travailleurs pour réaliser analyse statistique des différentes variables.
7. Échelle Samn-Perelli	Évaluation du niveau de fatigue perçue avant et après le quart de travail (évalué par les travailleurs sous forme d'échelle).	Collecte de données auprès de travailleurs pour réaliser l'analyse statistique de différentes variables.
8. Statistique inferentiel	Régression logistique binaire à partir de la dichotomisation du niveau de fatigue.	Identifier les variables ayant une possible influence sur la fatigue et la charge de travail.
9. Fatigue Index	Modèle mathématique pour calculer le risque potentiel de fatigue. Analyse basée sur la construction d'une douzaine de configurations de semaines de travail.	Évaluer et comparer le risque de fatigue associé à plusieurs configurations de semaines de travail.
10. AcciMap	Méthode utilisée pour réaliser une cartographie de facteurs contributifs à l'erreur à partir de résultats obtenus précédemment.	Identifier et mettre en lien des facteurs contributifs à l'erreur à travers plusieurs niveaux organisationnels.
11. STAMP	Méthode utilisée pour créer la structure de contrôle du système d'assemblage.	Identifier de possibles défaillances dans les mécanismes de contrôle et rétroalimentation.
12. HFACS	Système de classification (taxonomie) des actes dangereux dans quatre niveaux organisationnels.	Identifier et classer les possibles actes dangereux ou défaillance selon une taxonomie basée sur le modèle du fromage suisse.

Les prochains chapitres de la thèse (3, 4 et 5) correspondent aux trois articles de revue avec comité de lecture. Ceux-ci sont présentés à titre de résultats de la thèse. Nonobstant, chaque article a sa propre structure : introduction, méthode, résultats, discussions et conclusions. Le chapitre 3 est consacré aux résultats de l'étude de la fiabilité humaine correspondant au sous-

projet No. 1 de la thèse. Dans ceci il est question d'identifier et quantifier les différents modes d'erreur liés aux tâches critiques d'assemblage. Le choix de tâches critiques est fait à partir de l'analyse statistique de registres de qualité de l'entreprise. L'analyse de la fiabilité humaine nous permet ainsi d'identifier plusieurs facteurs contributifs aux erreurs dans le contexte objet d'étude et discuter de certaines pistes de solutions.

Le chapitre 4 aborde le sujet de la fatigue et la charge de travail. On présentera ici l'étude de terrain réalisée auprès d'un groupe de 14 travailleurs afin d'identifier certains facteurs pouvant exercer une influence sur le niveau de fatigue chez les travailleurs. Ladite étude s'est déroulée pendant une période de deux semaines où les travailleurs ont dû remplir plusieurs questionnaires. L'identification de possibles influences entre les variables étudiées a été possible en utilisant la statistique inférentielle. C'est le chapitre 4 qui concerne plus directement la participation de sujets humains dans notre recherche. Il présente les résultats du sous-projet No. 2 qui a fait l'objet d'une évaluation complète par le comité d'éthique institutionnel. La participation a été complètement volontaire et des questionnaires de consentement ont été remplis par les travailleurs participants.

Le dernier chapitre de la thèse (chapitre 5), présente les résultats de l'analyse avec approche systémique réalisée dans le cadre du sous-projet No.3. Ici, la compilation de données et de l'information obtenue au cours des sous-projets No. 1 et No. 2 ont été utilisées pour identifier les facteurs contributifs à l'erreur dans le système de production. L'interrelation entre ces facteurs a été décrite ainsi que la structure de contrôle hiérarchique associée. Ce chapitre fournit ainsi une vision holistique de la problématique objet d'étude dans cette thèse.

CHAPITRE 3

ARTICLE 1: CLASSIFICATION AND QUANTIFICATION OF HUMAN ERROR IN MANUFACTURING: A CASE STUDY IN COMPLEX MANUAL ASSEMBLY

Yaniel Torres ^a, Sylvie Nadeau ^b and Kurt Landau ^{a,b}

^a Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure (ÉTS), 1100 Notre-Dame St W, Mon-tréal, QC H3C 1K3, Canada

^b Institute of Ergonomics and Human Factors, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 2, 6429764287, Darmstadt, Germany

Article publié dans Applied Sciences, 11(2), 749 (doi: 10.3390/app11020749)
Special Issue: Applied Engineering to Lean Manufacturing and Production Systems 2020

Abstract

Manual assembly operations are sensitive to human errors that can diminish the quality of final products. The paper shows an application of human reliability analysis in a realistic manufacturing context to identify where and why manual assembly errors occur. The techniques SHERPA and HEART were used to perform the analysis of human reliability. Three critical tasks were selected for analysis based on quality records: (1) installation of three types of brackets using fasteners, (2) fixation of a data cable to the assembly structure using cushioned loop clamps and (3) installation of cap covers to protect inlets. The identified error modes with SHERPA were: 36 action errors, nine selection errors, eight information retrieval errors and six checking errors. According to HEART, the highest human error probabilities were associated with assembly parts sensitive to geometry-related errors (brackets and cushioned loop clamps). The study showed that perceptually engaging assembly instructions seem to offer the highest potential for error reduction and performance improvement. Other identified areas of action were the improvement of the inspection process and workers' provision with better tracking and better feedback. Implementation of assembly guidance systems could potentially benefit worker's performance and decrease assembly errors

3.1 Introduction

An efficient and reliable assembly process is a critical aspect of manufacturing. Such processes vary according to the physical arrangement of machines, equipment and workers, as well as the level of automation. Engineers usually consider several variables when selecting an appropriate assembly system, among them flexibility, productivity, product variants and production volume (Lotter et Wiendahl, 2009). Figure 3.1 shows the relationship between some of these variables and the level of automation in the assembly system. The development of industrial robotics has induced a significant increase in the automation and productivity of manufacturing processes, including assembly (Dinlersoz et Wolf, 2018). However, in manufacturing domains, where product complexity and variety present particular challenges, manual work remains a cost-effective alternative. Among these manufacturing domains are consumer electronics (Correia et al., 2018), aerospace manufacturing (Beuß et al., 2019; Judt et al., 2020), combustion engines assembly (Yang et al., 2012), automotive manufacturing (Falck et al., 2010; Krugh et al., 2016) and the production of industrial machines and tools (Bao et al., 1996; Botti et al., 2017)

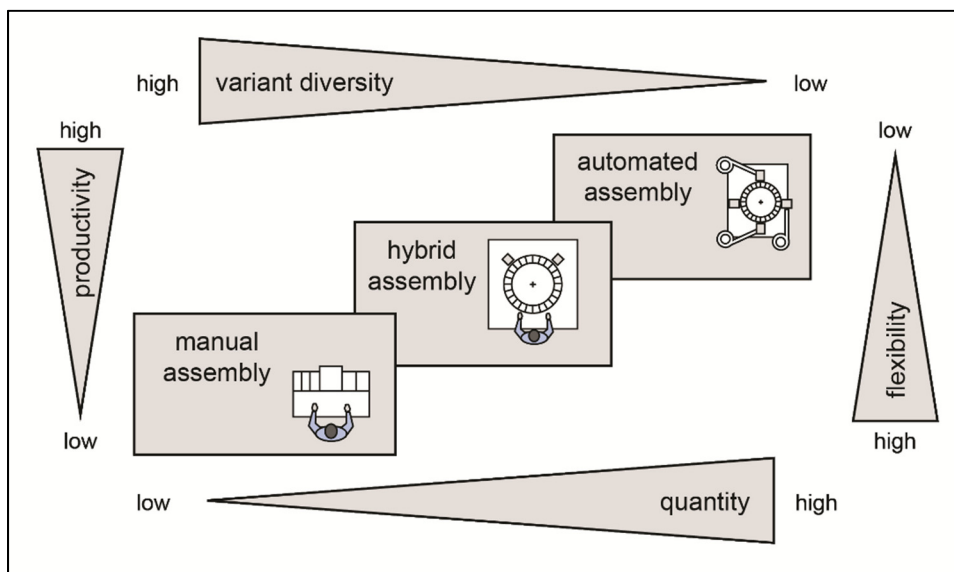


Figure 3.1 Utilization areas for manual, hybrid and automated assembly concepts
Tiré de Lotter and Wiendahl. (2009, p. 128)

For manual assembly to yield a final product of the appropriate level of quality, several operations must be executed properly. For example: selecting, handling and fitting parts; checking; applying force; and retrieving and analyzing information. Unfortunately, these operations are susceptible to human error and represent potential sources of defects. Swain and Guttman (1983) define human errors as ‘any member of a set of human actions that exceed some limit of acceptability, i.e., an out-of-tolerance action, where the limits of tolerable performance are defined by the system’. Other definitions and discussions of human error beyond the scope of this article can be found in the literature (Hollnagel, 2005; Reason, 1990b). Common error-related defects in manual assembly processes include loose connections, missing components, the installation of wrong components, improper application of force to fasteners, damage during assembly and contamination by foreign object debris (Falck et al., 2014; Richards, 2018). Poor physical and cognitive ergonomics have been found to increase errors and impact product quality (Falck et al., 2014; Rosenqvist et al., 2014). The links between human factors, errors and quality issues have been recognized in the literature (Kolus et al., 2018). Human errors in manual assembly are to be avoided due to the associated economic losses. For this reason, ergonomics and human factors discipline is considered to be a key practice area within the lean manufacturing approach (Wong et al., 2009).

With the introduction of Industry 4.0, manufacturing will experience an increase in product customization and a corresponding decrease in lot sizes. According to Thoben et al (2017), this mass customization is expected to escalate production complexity and could increase the demands on human operators’ skills. In this context, optimizing the working system is necessary to minimize human error. Identifying and understanding the factors that affect assemblers’ performance is the first step in the implementation of effective strategies. Bubb (2005), for example, argues that human reliability is crucial to improve quality in the manufacturing sector. However, human reliability research has mostly focused on safety, while less attention has been paid to the manufacturing sector and to manual assembly specifically (Pasquale et al., 2018). To close this gap, this paper applies classic human reliability analysis (HRA) techniques to a realistic case study of complex manual assembly. It assumes that some

HRA techniques, developed and mostly used in safety-critical domains, can also be useful in the analysis of human error in manual assembly context. The study's main goals consist of identifying the most common error modes, evaluating them, and determining the factors that influence the assemblers' performances. The paper also discusses potential strategies for the reduction of errors, including new technological approaches.

The research is articulated around a case study of complex manual assembly in a manufacturing setting (described in detail later in the paper). This case study is intended to provide new insights into human-related effects of assembly processes which might lead to new work design solutions as well as generate new research questions. Also, previous results of human reliability analysis may be critically questioned. The case study method is recognized as having an impact on the generalization of theoretical and empirical findings and it offers the possibility of studying a defined situation in great detail (Easton, 2010). Especially when researchers require holistic, in-depth investigation which demands that research goes beyond the study of isolated variables. This way, the examination of the manual assembly context object of study is an integral aspect of the understanding of the interactions within. This examination favors the collection of data in real settings (Yin, 2012). To this, several data collection and analysis methods were used to study the same phenomena following a mixed-methods approach (Flick, 2018). This includes, for example, statistical analysis of company records, analysis of work procedures, field observations, unstructured interviews and focus groups. This methodological approach supports the inquiry process in an integrative and convergent way (Fetters et Molina-Azorin, 2016). The case study included in this article is a realistic case distilled from the actual case that is confidential. Additionally, in the present paper, a complex manual assembly is defined as an assembly task that requires specialized knowledge and skills for the worker to be able to complete the task. The assembled object is composed of a high number of parts with a high number of possible choices among them while the geometry of the assembled object has several symmetric planes (Richardson et al., 2006). The cognitive demands on the assembler as consequence of information perception and information processing are relatively high (Landau et al., 2003). The conceptual debate around definitions of complexity is beyond the

scope of this article and is the focus of different scientific teams, we therefore invite the reader to consult the literature on this behalf (Falck et al., 2016; Frizelle et Woodcock, 1995b; Kuzgunkaya et ElMaraghy, 2006).

3.2 Literature Review

3.2.1 Some considerations about manual assembly

According to Swift and Booker (2013), manual assembly ‘involves the composition of previously manufactured components or sub-assemblies into a complete product or unit of a product, primarily performed by human operators using their inherent dexterity, skill and judgment’. Richardson et al. (2006) describe manual assembly as a spatial problem-solving activity that requires that workers build a mental model to understand and manipulate spatial information. The quality of the information contained in work instructions, the way this information is presented and how the worker interacts with this information are particularly important in manual assembly processes (Backstrand et al., 2008; Brodin et al., 2017; Li et al., 2018; Mattsson et al., 2018b). To take full advantage of the assemblers’ cognitive abilities, work instructions should clearly and unambiguously describe which components to use and how they should be assembled (Mattsson et al., 2018b). One accepted principle is that these instructions must be presented in such a way that anyone can understand them and conduct assembly accordingly (Atsuko, 2014). This way, work instructions can help to reduce the assemblers’ cognitive workloads, particularly by minimizing dynamic complexity (Frizelle et Woodcock, 1995a).

In modern manual assembly processes, work instructions are generally provided electronically and presented on a computer screen, as text supported by visual information (Backstrand et al., 2008; Brodin et al., 2017). However, according to Mattsson et al. (2016), instructions need to be more perceptual, which means that richer and more immediate sensory inputs should be provided to the assembler. Using three-dimensional models in work instructions can show the assembly process in a more realistic, accurate and intuitive fashion. Such Model-Based

Instructions (MBI) may present multiple views and easy-to-follow assembly procedures (Geng et al., 2015; Hagan et al., 2009). Recent technologies, such as augmented reality (AR), seem to promise even better means of delivering work instructions to assemblers. In a recent literature review, AR was identified as one of the two most promising technologies to support humans in manufacturing contexts, along with collaborative robots (Torres et Nadeau, 2020b). However, applications of AR are still in development and the technology has not reached full technological maturity (Bottani et Vignali, 2019; Mayrhofer et al., 2019).

Choosing the right parts during the assembly requires a certain amount of information processing and decision making, which is why the use of kitting systems has been explored as a strategy to minimize this cognitive load (Brolin et al., 2011). Parts kitting is a logistics technique used to deliver groups of parts together in one or more kit containers (Caputo et al., 2015). Generally, kits are prepared in a warehouse and delivered to the assembly line, to specific workstations, according to the production schedule. When kits are prepared properly, parts are supposed to be easily available, checked, and pre-positioned so that they can be removed rapidly from the container (Christmansson et al., 2002). According to Brolin (2017), a kit can be considered as a ‘carrier of information’ for assembly, meaning that work instructions are embedded in the kit itself. Medbo (2003) argues that appropriately structured kits can support assemblers and even facilitate learning. According to Caputo et al. (2015), kitting systems provide the opportunity for in-process quality control and additional checks, both in the kitting room or at the workstation. Kitting can therefore reduce the risk of a wrong part being assembled or of a part being omitted, by providing direct feedback to the assembler. Past research suggests that kitting may yield better quality and productivity when compared to other parts feeding policies (Brolin et al., 2017; Caputo et al., 2017; Medbo, 2003).

It has been acknowledged that errors cannot be entirely eliminated because they are considered to be a normal consequence of human variability (Hollnagel, 2000). Thus, during manual assembly, inspection is required to verify that a product is free of defects before it is transferred to the next level of assembly or shipped to the customer (See et al., 2017). In this way,

inspection allows the system to recover from human error. Historically, workers have performed these inspections visually. However, the limitations of humans as visual inspectors have long been recognized (Drury et Fox, 1975; Jebaraj et al., 1999). For this reason, automated visual inspection (AVI) has long been used in the manufacturing industry for quality control and monitoring (Konig et al., 1995; Suresh et al., 1983). As gains in computational power yield enhanced image acquisition, processing and analysis capabilities, automation replaces human visual inspection more and more often (Edinbarough et al., 2005; See et al., 2017). For example, a robot can take pictures of the final product to detect deviations and nonconformities. Such a system can validate the quality of final assembly based on its ability to perform optical characteristics recognition, such as detecting whether a specific component is absent. However, even though machine vision has been used in quality inspection for several years, it seems that technological challenges remain. According to Sobel (2019): ‘Many of the advances we take for granted in modern computing — ubiquitous connectivity, unlimited data storage in the cloud, insights drawn from massive unstructured data sets — have yet to be applied systematically to the factory floor in general and to computer vision specifically’. One drawback of centralized automated inspection at the end of the assembly line is that the identification of nonconformities is made too late and the cost of reworking may be considerable. Lean approaches seek to ensure the quality of the assembled object before it leaves the workstation to minimize costs and delays by eliminating waste (Gupta et Jain, 2013). As machine vision continues to evolve, it would be reasonable to expect that automated visual inspection might become sufficiently flexible to come to the assembly workstation. Thus, a centralized automated inspection would shift to an in-process, ubiquitous automated inspection carried out with a smart assistance system. These systems could combine, for example, wearable augmented reality with automated visual inspection (Eschen et al., 2018; Zheng et al., 2020) or use collaborative robots for automated visual inspection (Leidenkrantz et Westbrandt, 2019; Makrini et al., 2017).

3.2.2 Human reliability analysis: origins and applications in assembly systems

According to Embrey (1988), the essence of human reliability analysis (HRA) is the prediction and mitigation of error to optimize safety, reliability and productivity. HRA's main focus is the identification of sources of human error and the quantification of the likelihood of such errors (Boring et al., 2010). Over the years, the discipline of HRA has proposed several techniques (Holroyd et Bell, 2009; Lyons, 2009) which stem from the need to quantify human error for probabilistic safety analysis (PSA) in the nuclear sector (IAEA, 1989; IEEE, 2018). Other industries where HRA has been applied include aerospace, offshore oil extraction and chemical processing, all of them safety-critical domains (Calixto, 2016; Yang et al., 2014). Human reliability analysis represents the intersection of reliability engineering and human factors research (Hollnagel, 2005). Reliability engineering seeks to predict overall system reliability based on system configuration and probabilistic estimates of component failures (Høyland et Rausand, 2009). According to Boring et al. (2010), human factors research provides the empirical basis to support predicting human performance in HRA. In practical terms, human performance is predicted by calculating human error probability (HEP). Mathematically, human error is treated as the failure of a technical component. However, some HRA techniques focus on human error identification rather than the calculation of human error probabilities (CCPS, 2004; Oxstrand et al., 2010).

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is a well-established reliability engineering technique used to assess vulnerabilities in a system proactively (Stamatis, 2003). It has been used in manufacturing and manual work (Kmenta et al., 2003). Quality Function Deployment (QFD), a quality research technique, has also been used to redesign product functionality to reduce complexity in assembly (Armacost et al., 2002). Despite these examples, a recent literature review by Pasquale et al. (2018) concluded that: 'a prospective analysis of human reliability in the manual assembly systems until now has been neglected in the literature and few papers investigated the range of human error and the type of errors that occur in this field'. However, this conclusion is based on a rather small number of relevant documents, i.e., 20

peer-reviewed papers published in English between 2005 and 2017. Authors from manufacturing powerhouses like Germany, France and Japan, who published in their native languages, were not considered. While non-exhaustive, Table 3.1 shows additional developments and applications of HRA to manufacturing and manual assembly.

Broadly speaking, there are two main approaches to human reliability in manual assembly: the development of context-specific techniques (Caputo et al., 2015; Di Pasquale et al., 2015; Kern et Refflinghaus, 2013) and the application of classic HRA techniques with or without modifications (Bubb, 2005; Paz Barroso et Wilson, 1999; Yang et al., 2012). Context-specific methods are expected to provide more precision in the calculation of HEP, but they are more resource-intensive. For example, Methods Time and Quality Measurement (MTQM), developed in Germany, requires in-depth knowledge of predetermined motion time systems (PMTS) and high investments in training time and money (Refflinghaus et Kern, 2018). Little information about context-specific techniques is available, which hinders replication of the analysis process. On the other hand, classic HRA techniques like THERP, HEART or SHERPA are well represented in the literature and enough information is available to carry out an analysis. Furthermore, the importance of obtaining a precise final value of HEP depends on the intended final use of this numerical value. Kern and Refflinghaus (2015a) used assembly specific databases as part of MTQM, to calculate precise estimates of HEP. This is necessary because HEP values are used as part of a production planning tool to conduct cost-benefit analysis. More recently Torres et al. (2019a) proposed an intervention framework for the analysis of human error in manual assembly. This framework is based on the use of well-known HRA techniques and is in line with the idea proposed by Bubb (2005), who suggests using HRA to identify error modes and calculate human error probabilities (HEP) in manual assembly.

3.3 Material and Methods

In this study, we focus on one case study of complex mechanical manual assembly. Several data collection methods were used to support the human error analysis process: searching quality records to select critical tasks based on statistical analysis, familiarization and analysis of work instructions from the manufacturing execution system (MES), field observations of the tasks execution, unstructured interviews and focus group meetings with line supervisors, quality specialists and assemblers. The whole process was led and supervised by experienced engineers and researchers in ergonomics and manufacturing. The participation was completely voluntary and the whole study received approval from the university research ethics committee (November 7, 2018).

The five steps of the human error analysis process used in this study are presented in Figure 3.2. The techniques included in the human error analysis process (HTA, SHERPA and HEART) were selected according to operational criteria from the literature (Holroyd and Bell 2009; Lyons 2009) and considerations crucial to the manufacturing context: time, simplicity, availability of information, level of validation and analyst-oriented techniques. Further information about HTA (Annett, 2003), SHERPA (Embrey, 1986) and HEART (Williams, 2015) can be found in the literature. A brief description of the five steps follows. A brief description of each of the five steps is presented subsequently.

Tableau 3.1 Some developments and applications of HRA to manual assembly in manufacturing

Author reference	Type of document	Objective	Overview	Mentioned in <i>Pasquale et al. (2018)</i>
(Paz Barroso et Wilson, 1999)	Journal paper	An analytical framework is proposed: HEDOMS—Human Error and Disturbance Occurrence in Manufacturing Systems.	The framework has two modules. Module 1 discusses the selection of critical tasks to be analyzed (based on data, statistics and initial solutions). Module 2 is a modification of classic human reliability analysis techniques. No application was reported.	No
(Kmenta et al., 2003)	Conference paper	A novel technique developed specifically to identify manual assembly errors is proposed: “Assembly FMEA”.	Assembly defect levels are related to assembly complexity, which can be estimated using “Design for Assembly” (DFA) time penalties. Hence, Assembly FMEA uses a series of DFA-related questions to elicit potential assembly defects.	No
(Bubb, 2005)	Journal paper	A reflection is conducted on how HRA can help to improve quality in manual assembly through the use of literature and examples.	The article describes the major tenets of HRA and its relationship with quality in production. THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) is used in a study case from manual electronic assembly.	Yes
(Blais, 2011)	Thesis Dissertation	A methodology is proposed to support engineers and technicians in the selection of the best error-proofing actions during product development. This is intended to minimize errors from the design phase.	The proposed methodology is based on historical data and the FMEA technique. It offers a list of 36 error-proofing approaches to consider. The selection of the best approaches is based on cost calculations and the impact on quality. The methodology is based on Toyota’s production system. Application reported in a mixed production assembly of a three-wheeled motorcycle.	No
(Yang et al., 2012)	Conference paper	A “novel” mixed methodology is proposed to analyze quality issues related to human errors in engine assembly.	The methodology combines a modified version of CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) with FTA (Fault Tree Analysis). Application reported on an assembly line of automobile engines.	No

Tableau 3.2 Some developments and applications of HRA to manual assembly in manufacturing (suite)

Author reference	Type of document	Objective	Overview	Mentioned in Pasquale et al. (2018)
Kern et Refflinghaus, 2013)	Journal paper	An assembly planning method is developed: MTQM (Methods Time and Quality Measurement) that allows the calculation of human error probabilities linked to predetermined motion times.	The taxonomy of error types was harmonized with nomenclature from MTM. Specific human error probabilities are based on data from German automotive manufacturing. Application reported in the automotive industry (Refflinghaus et Kern, 2018).	Yes
(Báez et al., 2014)	Conference paper	A human reliability model for assembly line manual workers is developed based on statistical analysis of personal factors.	The model was build using Cox proportional-hazards regression. Nine factors were evaluated in 120 assembly line operators using psychometric tests. Factors included in the model were: stress, motivation, memory, and personality. The model was developed in an electronic assembly.	No
(Meister, 2014)	Thesis Dissertation	The objective was to capture the structure of human errors in a production line and to describe the frequency in which these errors occur. Principles of Resilience Engineering were also explored.	A detailed analysis of error types and error probabilities; the findings are intended to be incorporated into future planning and development operations. A system theory model was used to understand specific human behaviors and their adaptation to disturbance variables. Application at an engine production facility.	No
(Caputo et al., 2015)	Conference Paper	A quantitative model is developed to assess errors in kitting processes for assembly line feeding. The model allows quantifying costs of error-related quality issues.	Event trees are adopted to keep track of unwanted events and error correction opportunities during the entire logistic process, starting from material picking in the warehouse to kit delivery at workstations and parts assembly. An application example is included.	No
(Di Pasquale et al., 2015)	Journal paper	A new Human Reliability Analysis (HRA) method is presented: The Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA).	A theoretical framework is provided, and human reliability is estimated as a function of the performed task, the Performance Shaping Factors (PSF) and the time worked.	(Di Pasquale et al., 2015)

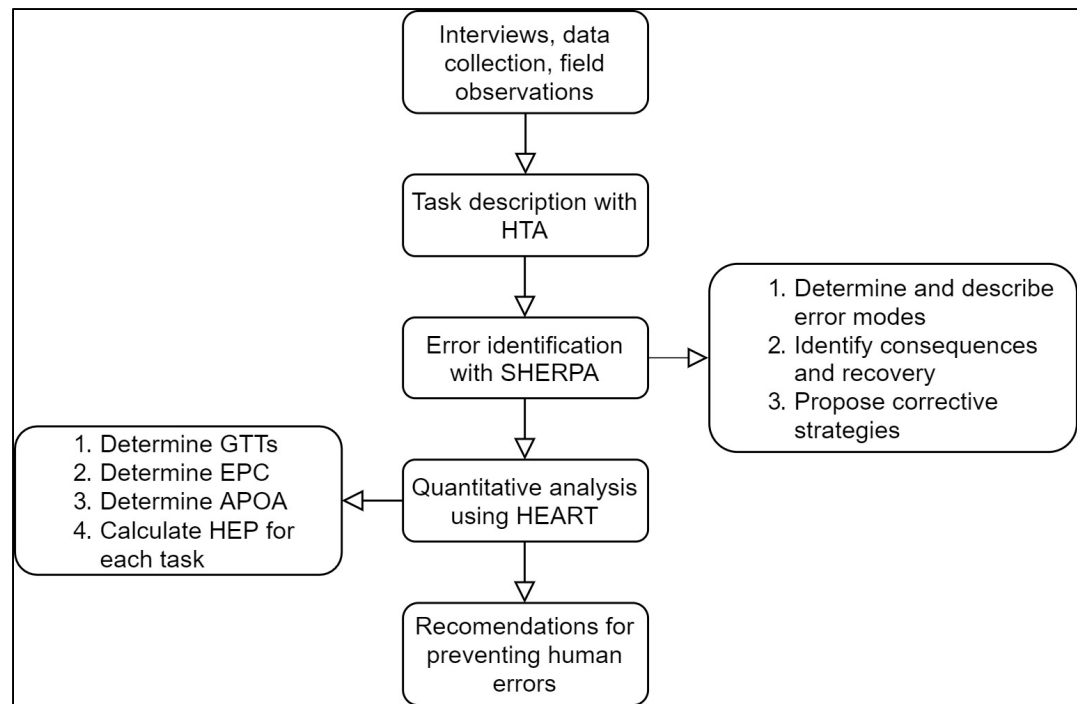


Figure 3.2 Human error analysis process used in the study. [HTA= Hierarchical Task Analysis; SHERPA= Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach; HEART= Human Error Assessment and Reduction Technique; GTT= Generic Task Type, EPC= Error producing condition; APOA= Assessed Proportion of Effect; HEP= Human Error Probability]

Step 1: Selection of critical tasks

The selection of the tasks for analysis was primarily based on data from the company's records. The objective was to identify a group of tasks that were a frequent source of errors. The company quality records were explored for a 36-month period prior to the study. Descriptive statistics allowed to identify parts representing a high percentage of the assembly related quality issues as well as assembly line, workstations and tasks subject of concern and where the research should focus.

Step 2: Task description

Once the tasks to be analyzed have been chosen, each of them was broken down into the

subtasks required to achieve the overall goal of the task. This is achieved using the Hierarchical Task Analysis technique developed by Annett (2003). The description of the tasks was based on the study of work procedures as described in the manufacturing execution system (MES). Also, 40h of field observations supported this and other steps within the human error analysis process. To this, five assemblers were observed during an entire workday (eight hours) at their respective workstations. The selection criterion was based on criticality and not on statistical representativeness, i.e., the workstations that represent the main sources of quality issues were selected for the observations. These workstations belong to the assembly line with the highest rate of quality issues per 10 thousand labor hours.

Step 3: Identification of human errors

SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) was used to identify human error modes associated with the tasks analyzed (Embrey, 2014). For this, each bottom-level subtask from the HTA was associated with one or more error modes proposed in the SHERPA taxonomy of errors. The error modes are described, and corrected strategies are identified. Information is then compiled and presented in tabular form. In this study, a focus group composed of line supervisors, quality specialists and experienced assemblers provided the necessary information for the process of classifying human errors. Three meetings of approximately 1.5h each were carried with the focus group.

Step 4: Quantification of human error

The quantitative analysis in this step was performed based on HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique). HEART contains three main elements which are the following:

- Generic task type (GTT): the analyst should specify which of the eight generic task types proposed in HEART best match the task object of analysis and determines the nominal HEP for the task based on the mean HEP value associated with the corresponding GTT
- Error producing condition (EPC): these are conditions that may influence the human

reliability, mathematically they represent modification weights for the nominal HEP. HEART proposes a table with a list of 40 EPCs and their relative maximum effect on performance in the form of a numerical value.

- Calculation method: the method for calculation of human error probability evaluates the EPCs weights based on their relative importance to each other in the task context. In this manner, an assessed proportion of the error producing conditions (APOA) is obtained. The final HEP can be yielded, as shown in Equations (1) and (2):

$$HEP = GTT_i \times \prod WF_j \quad (3.1)$$

$$WF_j = [(EPC_j - 1) \times APOA_j + 1] \quad (3.2)$$

where WF_j = weighting effect for the j th EPC; EPC_j = error-producing condition for the j th condition; $APOA_j$ = assessed proportion of ‘affect’ for that condition; HEP = final human error probability; GTT_i = central value of the HEP task (distribution) that is associated with a task i ; GTT = generic task type.

Description of the case study

The case consists of a mechanical assembly worker installing various components to the main structure of the object being assembled. Instructions are delivered by the manufacturing execution system (MES) and displayed on a computer terminal at the workbench (PC stationary screen), which is located approximately 2 meters from the assembly position. Instructions consist of text and 2D drawings providing basic visual descriptions of assembly steps. Parts are stored in bins at the workbench. The worker moves around the assembly position at the center of the workstation as needed. Figure 3.3 shows the schematic representation of the assembly workstation’s layout and the general workflow.

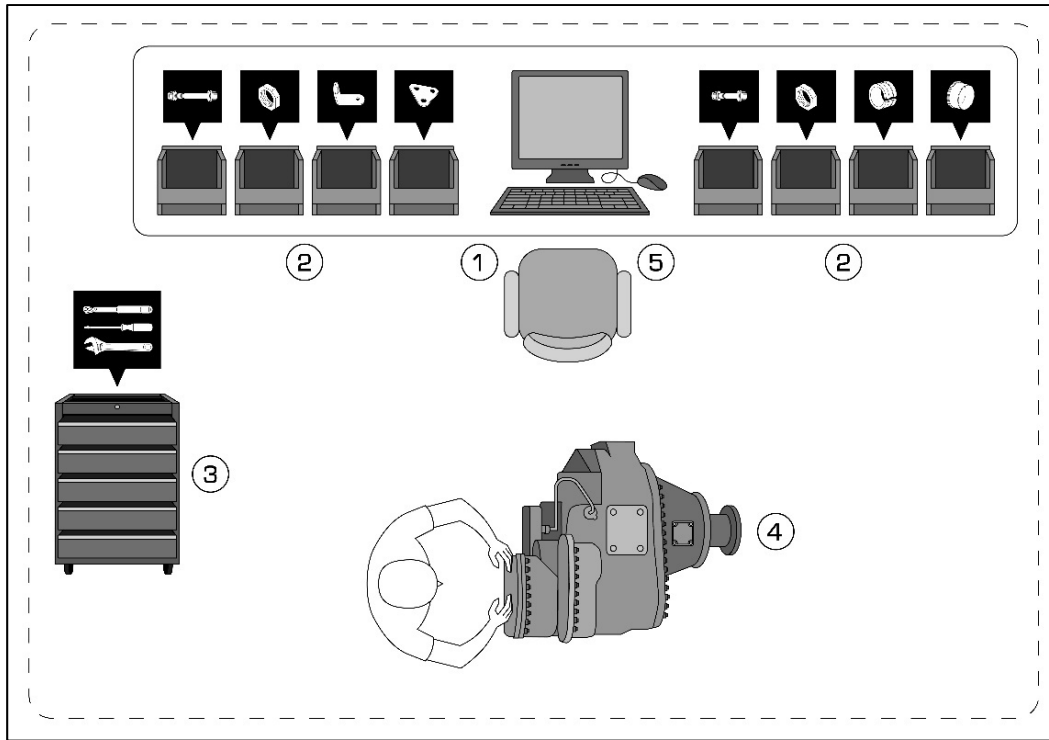


Figure 3.3 Workstation's layout (not to scale) and general workflow: [1] read work instruction on the PC, [2] pick the parts from bins, [3] pick tools from the tool cabinet, [4] execute assembly operations and [5] close work instructions on the PC

The assembly line consists of six workstations with similar characteristics to the workstation shown in Figure 3. The main assembly structure is transferred from one workstation to the next using a dolly. The height and direction in space can be modified to gain access to the main structure of the assembly.

3.4 Results

3.4.1 Selection and description of critical tasks

Numerous manual assembly tasks are performed on the assembly line, but for the case study presented in this paper, a set of basic tasks were selected as critical tasks. These tasks involve assembly parts responsible for an important number of quality issues according to company

records (36-month analysis period prior to the study). For example, 67% of wrongly installed parts were associated with brackets (27%), loop clamps (25%) and bolts (15%). Similarly, 65% of missing parts were associated to cap covers (40%), brackets (13%) and loop clamps (12%). Following this, the three basic critical tasks were:

1. Install three brackets at specific locations according to the work procedure.
2. Secure a data cable to the main structure with three cushioned loop clamps.
3. Install four cap covers to protect access points to the structure.

To provide a comparative idea of the different cycle times, these were estimated using MTM-1 (Method-Time Measurement), a predetermined motion time system (Morlock et al., 2017). The estimated cycle times for the tasks analyzed were 155 s, 51 s and 28 s respectively. Brackets are secured with nuts and bolts, while cushioned loop clamps are attached to the main structure with tie wraps. Torque is applied with a wrench according to specifications provided in the assembly instructions. Parts used in the assembly tasks are presented in Figure 3.4. A check for missing parts is carried out by the worker at the end of each task cycle. The selected tasks can be considered representative, to some extent, of the manual assembly process under study.

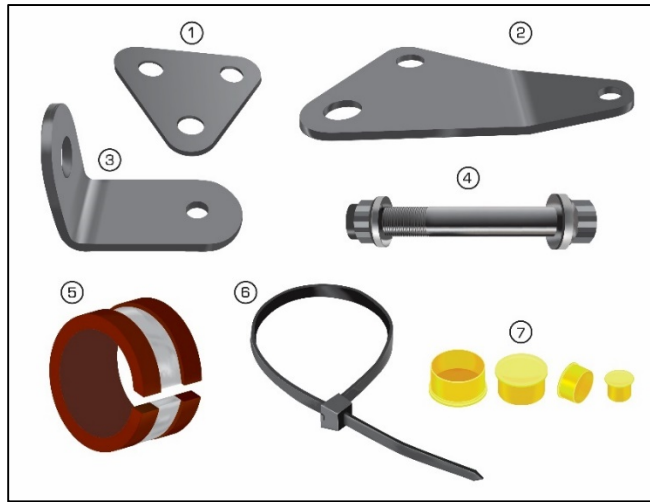


Figure 3.4 Parts used in the assembly tasks: [1] bracket A, [2] bracket B, [3] bracket C, [4] nut and bolt, [5] cushioned loop clamp, [6] tie-wrap, [7] cap covers

An example of a 2D drawing provided to the assembler in the work instruction of the task: (1) Install three brackets at specific locations according to procedure, is shown on Figure 3.5. Work instructions are displayed in a 19-inch stationary PC monitor. The input devices on the computer are a mouse and a keyboard, both connected by cables to the computer.

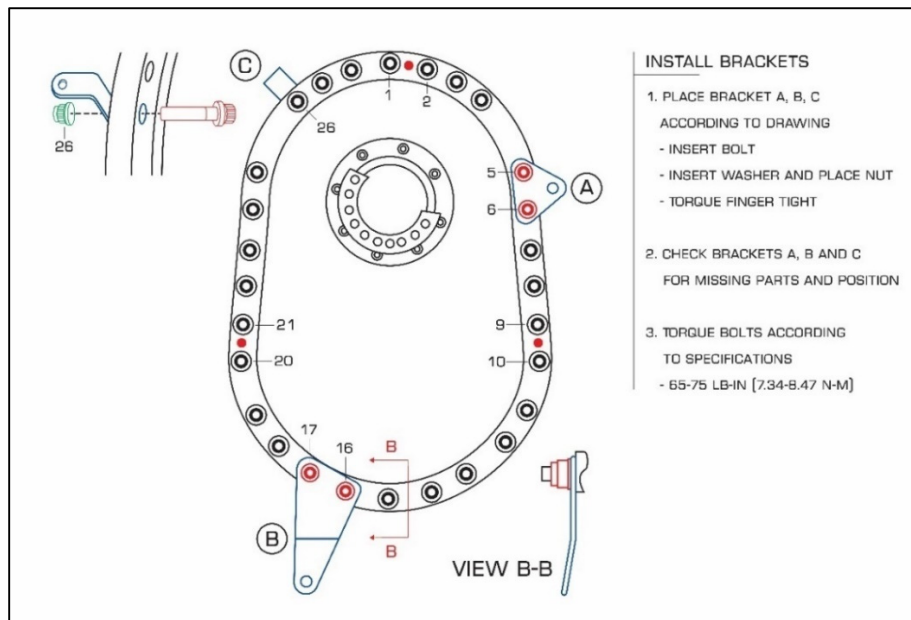


Figure 3.5 2D drawing presented on work instruction related to the installation of brackets A, B and C

In Figure 3.6 it can be seen the bracket A finally installed in the assembly location and secured with two bolts to the structure. While Figure 3.7 shows the data cable and the cap covers already installed on the assembly object. The data cable is secured to the structure while the cap covers are installed to protect different inlets.



Figure 3.6 Bracket A secured to the structure in the final assembly location

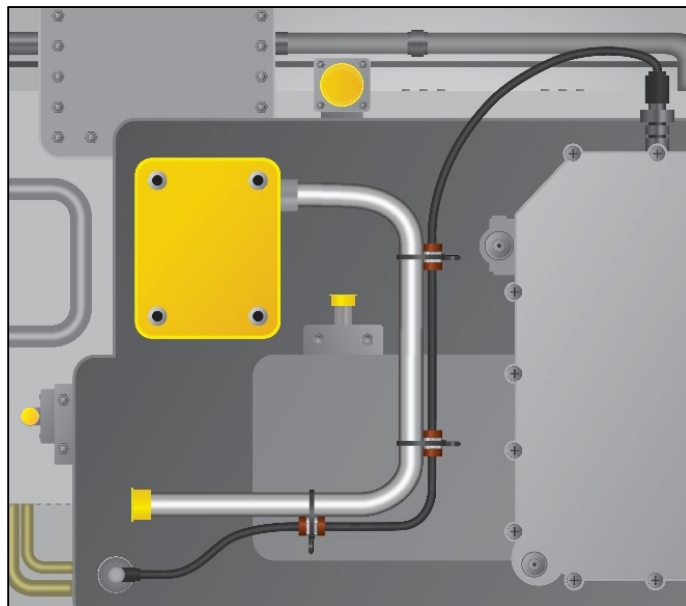


Figure 3.7 Installation of data cable and cap covers in their respective assembly locations

Figure 8 shows the breakdown of the critical basic task: install brackets. This HTA diagram is presented as an extract of the set of diagrams developed for the breakdown of the critical tasks under analysis. Subtasks 1.1 to 1.4 repeat for each of the brackets A, B and C, representing 12 subtasks which are grouped for the sake of diagram simplification.

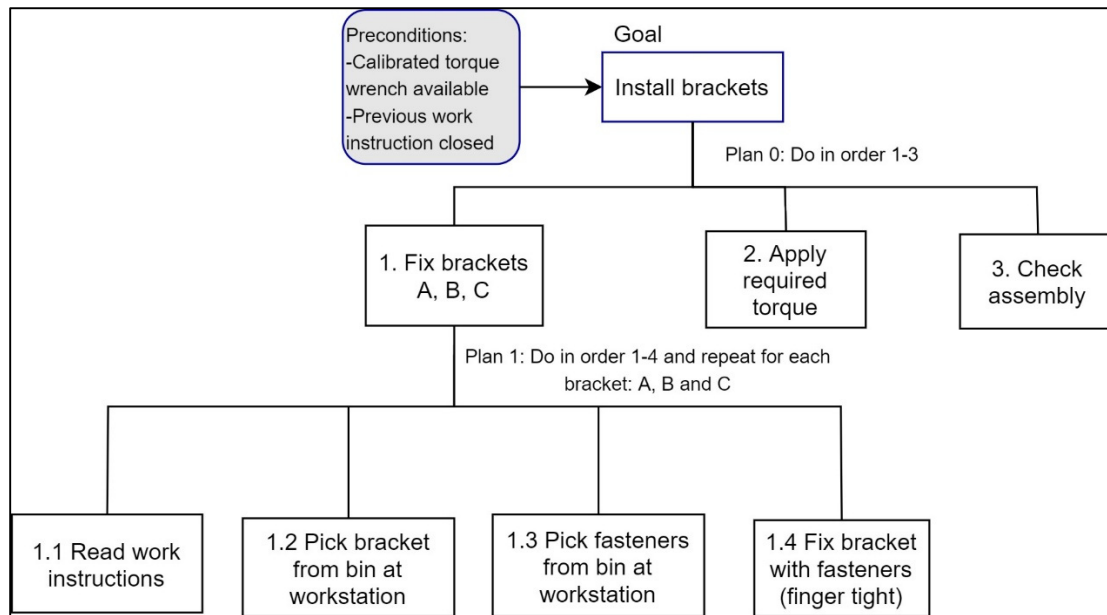


Figure 3.8. HTA diagram for the breakdown critical task install brackets

3.4.2 Identification and description of error modes

HTA and SHERPA were applied to each task under evaluation, yielding a total of 59 identified error modes. Bracket installation accounted for the highest number of error modes with 34 (58%), followed by the installation of cushioned loop clamps with 19 error modes (32%), and the installation of caps covers with six (10%) error modes. We found errors belonging to four of the five categories proposed in the SHERPA taxonomy: Action, Retrieval, Checking and Selection. The absence of communication errors is explained by the limited amount of teamwork in the context under study: information is usually supplied to the worker

electronically and not by a colleague. For the sake of simplification as well as the need to avoid repeated tables only an extract of the SHERPA output table for the critical task *install brackets* is presented in Table 3.2. Similar tables were obtained as a result of SHERPA analysis for each of the critical tasks object of study. However, the consolidated results of the error modes obtained during the SHERPA analysis are presented in Table 3.3. Estimated cycle times are also presented at the end of Table 3 for comparison purposes. A more detailed description of each error mode is presented subsequently.

A3: Operation in wrong direction

The six errors in this category were identified in the installation of brackets and the installation of cushioned loop clamps (secure data cable). All these parts must follow a specific spatial orientation according to drawings shown in the assembly instructions.

A4: Too little/much operation

Fasteners must be tightened by applying torque with a specific amount of force. An operation is considered out of specifications if the fastener is too loose or too tight. Five bolts are required to install brackets, which accounts for the five error modes in this category.

A5: Misalignment

Like operation in the wrong direction (A3), misalignment is especially prevalent during the installation of brackets and cushioned loop clamps. A bracket can be fastened to one of several holes. It is therefore possible to install a bracket in a shifted position from the one specified on the instructions. Cushioned loop clamps are also subject to this kind of error mode because the correct position of the cushioned loop clamps could be hard to determine. Six error modes have been identified in this category.

Tableau 3.2 SHERPA output-human error analysis table for critical task install brackets

Task Step	Task description	Error Mode	Error Description	Consequence	Recovery	Remedial Strategy
1.1	Read work instructions	R2: Wrong information obtained. R3: Information retrieval incomplete.	Improper interpretation of drawings. Incomplete reading of work instructions.	A wrong mental representation of the task to be completed leading to improper execution.	None	Improve work instructions: e.g., use interactive 3D models. Improve instruction delivery systems.
1.2	Pick the bracket from bins at workstations .	S2: Wrong selection made. A8: Operation omitted.	Selection of a different bracket model. Bracket not picked.	A different bracket installed. A missing bracket in the assembly	Step 3	Clearly identifiable and labeled bins or validation with a barcode system. Introduction of kitting feeding system.
1.3	Pick fasteners from bins at the workstation	S2: Wrong selection made. A8: Operation omitted.	Selection of a different fastener. Fasteners not picked.	A different fastener installed, e.g., shorter bolt same caliber. A missing fastener in the assembly.	Step 1.4	Better tracking and guidance during the assembly process.
1.4	Fix the bracket in proper position.	A3: Operation in wrong direction. A5: Misalignment.	Bracket installed in the wrong direction. Bracket installed in the wrong position (wrong holes).	A misplaced bracket installed on the assembly not according to design specifications.	Step 3	Access to more realistic work instructions directly or near the assembly place.
2.	Apply required torque.	A4: Too little/much operation. A8: Operation omitted.	Torque applied out of specifications. Force not applied.	Loose fasteners or fasteners too tight. Damage to nuts and bolts	Step 3	Torque wrench & Error proofing system.
3.	Check assembly	C1: Check omitted. C2: Check incomplete.	Omission to check previously installed parts. Check not done thoroughly.	An undetected quality issue which crosses the recovery barrier.	None	Avoid distractions and interruptions. In situ visual automated inspection.

Tableau 3.3. Consolidated results of error modes obtained with SHERPA for the three tasks under study

Error modes	Install Brackets	Secure data cable	Install Cap Covers	Total
A3: Operation in wrong direction	3	3	-	6
A4: Too little/much operation	5	-	-	5
A5: Misalignment	3	3	-	6
A8: Operation omitted	9	6	4	19
R2: Wrong information obtained	3	1	-	4
R3: Information retrieval incomplete	3	1	-	4
C1: Check omitted	1	1	1	3
C2: Check incomplete	1	1	1	3
S2: Wrong selection made	6	3	-	9
<i>Total</i>	34	19	6	
<i>Cycle times</i>	155 s	51 s	28 s	

Note: Symbol [-] indicates that no error mode of the associated category (row) was found during the analysis of the task under consideration (column).

A8: Operation omitted

Workers can omit to install brackets, bolts, cushioned loop clamps, tie-raps or cap covers. They can also omit to apply the required force to fasteners. These multiple causes explain why this error mode is the most prevalent with 19 counts.

R2: Wrong information obtained

This error mode covers instances in which the work instructions were incorrectly assimilated. The installation of each bracket requires the retrieval of specific spatial information. All cushioned loop clamps are considered part of the same subassembly and information is captured once. In total, four error modes were counted.

R3: Information retrieval incomplete

Like wrong information obtained (R2), this kind of error is related to work instructions. In this case, the worker interpreted the work instructions correctly but only read part of them. Four error modes were identified, in the same circumstances as for R2.

C1: Check omitted

Checking is considered a normal part of the assembly cycle, as opposed to an inspection activity. Three error modes were identified, one for the verification expected at the end of each task.

C2: Check incomplete

One or more component(s) were not checked during the verification at the end of a task cycle. Incomplete checking is equivalent to a partial omission of the check. There are three error modes in this category, same as for C1.

S2: Wrong selection made

The assembler must obtain the required part from a bin at the workbench. Parts are often similar, which could lead the worker to pick the wrong one: several brackets, cushioned loop clamp and fastener variants can be found in the bins. Nine error modes were counted.

3.4.3 Human error probabilities calculation

A human error probability (HEP) was calculated for the incorrect installation of each of four types of parts: brackets, cushioned loop clamps, cap covers and the generic part fasteners. The calculations followed the guidelines provided by William (2015) in the original article describing the HEART method. The generic Task Type assigned to each part installation was routine, highly practised, rapid task involving relatively low level of skill, which corresponds to task type E in the HEART nomenclature. The Generic Error Probability for this task type is 0.02. The number of Error Producing Conditions (EPC, also known as Performance Shaping

Factors or PSF) was limited to no more than five for each of the parts analyzed. Although HEART provides a list of 40 Error Producing Conditions, Boring (2010) acknowledges that three to nine PSFs are generally sufficient to arrive at a screening value in the quantification phase. For the sake of simplification as well as the need to avoid repeated calculations, only an extract of the HEART calculation table for the critical task install brackets is presented in Table 3.4. The consolidated results of the HEART analysis are presented in Table 3.5.

Tableau 3.4 HEART calculation of the HEP for brackets

Generic Task Type E		Generic Error Probability: 0.02		
EPCs	Maximum multiplier	Assessed proportion of effect	Assessed effect	% Contribution to HEP
(5) No means of conveying spatial and functional information to operators in a form which they can readily assimilate	x8	0.7	$= ((8-1) \times 0.7) + 1 = 5.9$	49%
(39) Distraction and task interruptions	x4	0.3	$= ((4-1) \times 0.3) + 1 = 1.9$	15.6%
(12) A mismatch between perceived and real risk	x4	0.2	$= ((4-1) \times 0.2) + 1 = 1.6$	13.2%
(17) Little or no independent checking or testing of output	x3	0.3	$= ((3-1) \times 0.3) + 1 = 1.6$	13.2%
(31) Low workforce morale	x1.2	0.2	$= ((1.2-1) \times 0.4) + 1 = 1.08$	9%
HEP= $0.02 \times 5.9 \times 1.9 \times 1.6 \times 1.6 \times 1.08 = 0.62$				

Note: A similar analysis was conducted to calculate the Human Error Probability for each of the parts under analysis. The consolidated results are presented in Table 3.5

The first and second columns of Table 3.5 show the identified EPC and the proposed multiplier according to HEART analysis. The percentages in the other columns represent the contribution of each EPC to the probability of failure for each component. Table 3.5's bottom row shows the total Human Error Probabilities.

Tableau 3.5 Consolidated results of HEP calculations and Error Producing Conditions with their respective % contribution

Error Producing Conditions	Maximum multiplier	Brackets	Cushioned loop clamps:	Fasteners (bolts-nuts)	Cap-covers
(5) No means of conveying spatial and functional information to operators in a form which they can readily assimilate	x8	49%	42%	*	*
(12) A mismatch between perceived and real risk	x4	13%	15%	*	*
(13) Poor, ambiguous or ill-matched system feedback	x4	*	*	30%	*
(17) Little or no independent checking or testing of output	x3	13%	15%	22%	35%
(26) No obvious way to keep track of progress during an activity	x1.4	*	*	14%	23%
(31) Low workforce moral	x1.2	9%	10%	*	*
(39) Distraction and task interruptions	x4	16%	18%	34%	42%
Human Error Probability	---	0.62	0.47	0.29	0.09

Note: Symbol [*] indicates that the Error Producing Condition (row) was not identified during the analysis of the part under consideration (column)

3.5 Discussion

SHERPA analysis shows that brackets and cushioned loop clamps are particularly sensitive to operation in the wrong direction (A3) and to misalignment (A5). These error modes can be considered geometry-related since the proper installation of these parts requires some spatial abilities. Information errors such as the acquisition of the wrong information (R2) and incomplete information retrieval (R3), also identified during SHERPA analysis, can be considered precursors to geometry-related errors because of the impact of the information system on the assembler's cognitive load (Brolin et al., 2017). Simultaneously, HEART results show that brackets and cushioned loop clamps had the highest Human Error Probabilities (0.62 and 0.47 respectively) compared to fasteners (0.29) and cap covers (0.09). Interestingly, the lack of a means of conveying spatial and functional information to operators in a form which they can readily assimilate is a major Error Producing Condition (EPC) in the HEP calculation. This EPC was the single most important in the HEART analysis (x8 multiplier) and represented 49% and 42% of the total contribution to human error probabilities for brackets and cushioned loop clamps respectively. The results obtained by using HEART are consistent with results from an empirical study in truck engine assembly where the potential error reduction obtained as a consequence of changing the information system was in the order of 40% (Backstrand et al., 2008).

It is important to highlight that the work instructions were provided as text and 2D drawing sheets on a stationary PC display, which has been found to be less effective than 3D instructions when spatial abilities are required (Hoyek et al., 2014). It has been acknowledged that work instructions are often deficient or underused in final assembly (Brolin et al., 2017; Li et al., 2018). Another point of concern is how the assembler interacts with the work instructions. The computer screen displaying the instructions in the study case is located on the workbench. However, the worker is frequently at some distance from the screen during the actual assembly. Instructions may not be easily readable from a distance, nor may the worker be able to figure out details on the drawings. This will demand frequent trips from the assembly

position to the workbench to retrieve information. Larger screens could help, although the worker's movement around the assembly position might still frequently leave the screens out of sight. This situation was reported by Mayrhofer et al. (2019): a large overhead screen was installed on an aircraft part assembly line, but the worker had to move to retrieve the information because the screen was not visible from all angles and working positions. Neither do wide screens solve the need to move to the workbench to interact with the work instructions (validate, close instructions, go to following instruction, etc.), which is done primarily with a mouse and keyboard. Optimizing the content of work instructions, their display and the interaction process between worker and instructions seems to be paramount to complex assembly performance.

As the SHERPA analysis shows, two major error modes are associated with the systematic application of force to fasteners during assembly: the application of too little/much force (A4) and the omission of the operation (A8). In both cases, specifications are not met, and the integrity of the assembly can be compromised. Results from HEART show that the most important contributors to human error probability of failure in this context are distractions and task interruptions (34%) and poor, ambiguous or ill-matched system feedback (30%). The latter refers to the fact that the system provides no direct feedback to the assembler when a bolt is missing, too tight or loose: the responsibility for verification falls to the assembler. A torque wrench can provide direct feedback while tightening but this does not solve the issue of missing fasteners and introduces calibration/certification challenges (Boeing, 2013). The worker may also forget to check the applied torque value. Feeding parts to the assembly line in kits constitutes a more traditional way to avoid errors of omission (A8) as the omitted part will remain in the kitting container, thus providing direct feedback to the worker. The number of parts provided by the kitting system should match the needs of the associated task, so that there are neither missing nor superfluous parts in the kitting box or rack (depending on the size of parts). As explained in the literature review, kitting systems also ease the process of selecting parts from bins, thus decreasing the probability of encountering the wrong part selected (S2) error mode. Wireless-enabled tightening systems that improve torque application reliability

constitute a support to the assembler (Brands, 2018). Error-proofing fastening tools have been successfully used in assembly since the late 1980s when power tools equipped with electronic sensors to control torque became available (Camillo, 2010). Artificial intelligence and machine vision can further develop the potential of these error-proofing systems.

The checks performed by the assembler at the end of each cycle can be treated as a low-key form of inspection because the search for nonconformity is more casual than during active inspection, where a person is directed to inspect specific items of equipment, usually using specific written procedures like checklists (Swain et Guttman, 1983). Error modes C1 (check omitted) and C2 (check incomplete) constitute failures of these low-key inspections. While checks performed by the assembler act as a barrier to the propagation of errors, this type of barrier can be sensitive to attention and interruptions as well as the well-known limitations of visual inspection (Dorris et Foote, 1978; Jebaraj et al., 1999). Further along the assembly line, in-process active inspection is carried out by other assemblers following specific instructions, sometimes in teams to provide human redundancy, but these measures are susceptible to the same shortcomings, which is why automated visual inspection is often used at the end of the assembly process. It would be reasonable to expect automated visual inspection to become more flexible as computer vision improves. For this reason, the deployment of automated visual inspection at the assembly workstation itself should be explored. This would result in a shift from a centralized automated inspection to an in-process, ubiquitous automated inspection carried out with a smart assistance system.

According to HEART, distractions and interruptions affect the probability of human error during the installation of all the parts under study to various degrees, i.e., from 16% for brackets to 42% for cap covers. Attention failures have been associated with many skill-based errors in the Rasmussen SRK model (Rasmussen, 1983), such as the breakdown in visual scan patterns, the inadvertent activation of controls, and the disordering of steps in a procedure (HSE, 2018; Shappell et Wiegmann, 2000b). Distractions represent the drawing of attention away from the task, potentially causing confusion and increasing the likelihood of task failure. Either way,

the potential impact on performance during manual assembly must be considered. Kilbeinsson et al. (2017) issue guidelines for the design of interruption systems that minimize errors and delays during assembly.

Criticism of human reliability analysis (HRA) has focused on the accuracy of human error probability computations (Hollnagel, 2005) and on the assumption that human errors and machine failures can be treated similarly (IEEE, 2018) despite extensive variability among humans. Further, most of the research that supports HRA techniques was conducted in the nuclear sector, including the validation of HRA itself (Massaiu et al., 2018). For these reasons, some authors support the use of human error identification (HEI) techniques like SHERPA but exclude the quantitative aspects of HRA (Stanton et Stevenage, 1998). In the present study, human error probabilities calculated with HEART are not intended to be used in Probabilistic Safety Analysis (PSA) but they can be used for comparisons. The analysis shows that the installation of brackets has the highest probability of failure (0.62) compared with cushioned loop clamps (0.47), fasteners (0.29) or cap covers (0.09), which suggests an explanation for the differences between the number of quality issues associated with each of the parts. The probabilities calculated in this study are roughly similar to those reported by Richards (2018) for failure of properly installing an oil cap during aircraft maintenance (0.48-0.78). In both cases, the numerical values should be treated as tools for human error prevention rather than for prediction. For example, quantification allows the importance of the various factors affecting assembler performance to be compared. We argue that, despite its limitations, the quantification process constitutes a useful guide for the analyst during the search for solutions and, further, an important complement to the identification of human error modes.

3.5.1 Limits of the study

Even though the authors took care to represent the real context upon which the case was built as accurately as possible, it is often difficult to represent simply the complexity examined. Possible generalizations must be seen in light of the characteristics of the context in which the

study was carried out (Hodkinson et al., 2001). Besides, the study focused mainly on factors directly associated with the execution of the assembly task by the worker at his workstation. However, several other factors associated with the work organization can also have an impact on human performance and they should be addressed in future studies on manual assembly. This includes workload variation due to fluctuations in production demands, the overtime allocation practices and the arrangement of working hours, among others.

3.6 Conclusion

The paper shows how human reliability analysis (HRA) can be effectively applied in a manufacturing context. SHERPA and HEART, both classic HRA methods initially developed for critical safety environments, allowed the identification of potential errors and evaluation of the factors contributing to these errors. From the three critical assembly tasks initially selected, a total of 23 subtasks and 59 error modes were identified with SHERPA: 36 action errors, nine selection errors, eight information retrieval errors and six checking errors. According to HEART the highest human error probabilities were associated with assembly parts sensitive to geometry-related errors (brackets and cushioned loop clamps). The computed values of human error probabilities should be interpreted with caution because their greatest value lies in preventing and managing human error rather than in prediction. Nevertheless, HEART supports the analyst by providing a list of proven factors that can affect human performance and whose influence can be compared through their relative impact on human error probabilities. This process can shed light on the best possible strategies to improve assembler performance. For example, the study shows that when spatial abilities are required, the probability of errors can be reduced by providing assembly instructions that engage the worker's senses more effectively. This supports the idea, already discussed in the literature, that assembly work instructions have a major impact on dynamic complexity and should be optimized to decrease the cognitive workload.

The study also identified enhanced inspection processes, better operations tracking, better feedback to the worker, and the reduction of distractions and interruptions as ways to reduce error probabilities and improve overall assembly performance. Although some of these can be achieved by traditional means (e.g., kitting system, poka-yoke, human redundancy, etc.), technology can also decrease workers' cognitive load and reduce the dynamic complexity of assembly. With the development of human support technologies within the framework of the Operator 4.0 (Romero et al., 2016; Torres et Nadeau, 2020b), the integration of several technologies into assembly guidance systems could benefit workers and system performance. Questions remain regarding the proper selection and deployment of these technologies, particularly in relation to utility, usability, risks, and practical acceptability (Nadeau et Landau, 2018). Humans must remain at the heart of the reflection. Ergonomic analysis of the work systems, including human errors and reliability analysis, is a necessary step along the way. The application of human reliability analysis in manufacturing should be further explored including the development of methods adapted to this specific context.

CHAPITRE 4

ARTICLE 2: EVALUATION OF FATIGUE AND WORKLOAD AMONG WORKERS CONDUCTING COMPLEX MANUAL ASSEMBLY IN MANUFACTURING

Yaniel Torres ^a, Sylvie Nadeau ^b and Kurt Landau ^{a,b}

^a Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure (ÉTS), 1100 Notre-Dame St W, Mon-treal, QC H3C 1K3, Canada

^b Institute of Ergonomics and Human Factors, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 2, 6429764287, Darmstadt, Germany

Article publié dans IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors 9(1):49-63 (doi: 10.1080/24725838.2021.1997835)

Abstract

Background: General fatigue and mental workload have been studied extensively in safety-critical contexts; wherein human performance degradation can lead to catastrophic outcomes. In the manufacturing sector, the physical demands of a job have received most of the attention because of the presence of biomechanical loads and the incidence of musculoskeletal disorders. However, in complex manual assembly, cognitive and chronobiology aspects of work can contribute to fatigue and degrade of worker performance. **Purpose:** We aimed to evaluate self-reported levels of fatigue and workload among a group of workers performing complex assembly tasks. We also sought to investigate several predictors of fatigue, including workload estimates, sleep duration, the shift being worked, and production levels. **Methods:** Fourteen assembly line workers participated in a two-week study. They evaluated their levels of fatigue at the beginning and end of each shift using the Samn-Perelli Fatigue Scale. They also evaluated their workload according to the NASA-TLX scale at the end of each shift. **Results:** High levels of fatigue (fatigue score ≥ 5) were reported in approximately one-third of 114 work shifts evaluated. Binary logistic regression indicated that fatigue scores at the beginning of the shift, NASA-TLX scores, and working evening shifts were significant predictors of high levels

of fatigue. Among the six dimensions measured by NASA-TLX, only mental demand and frustration were predictors of high fatigue. Mental demand was also rated highest by the workers. Participants reported less than seven hours of sleep in 60% of the nights evaluated.

Conclusions: These results suggest that cognitive load can contribute to fatigue in complex manual assembly work. Circadian and homeostatic processes related to shift duration, start times, and end times are also potential contributing factors. Similarly, existing work schedules may be contributing to sleep disruptions among workers.

4.1 Introduction

The long-term trend towards automation in manufacturing is accelerating with the implementation of Industry 4.0 techniques, which seek to digitize and interconnect products, value chains, and business models (Hempel et Glemser, 2017). Manual work, however, remains a cost-effective alternative, particularly in contexts that involve a high level of complexity and variety in production. Thus, many products are still being assembled by hand (Botti et al., 2017; Correia et al., 2018; Judt et al., 2020). By definition, manual assembly “involves the composition of previously manufactured components or subassemblies into a complete product or unit of a product, primarily performed by human operators using their inherent dexterity, skill and judgment” (Swift et Booker, 2013). For manual assembly to yield a final product of the required level of quality, several operations must be executed properly: selection, handling, and fitting of parts; verification; application of force; and information retrieval and analysis. These operations are susceptible to human error, which may lead to quality issues and significant economic losses (Bubb, 2005; Falck et al., 2014; Richards, 2018). From a work system perspective, the origin of human errors is often linked with the system design (Reason, 2000). It has long been recognized that quality deficiencies, human errors, and ergonomic problems often share the same causes, which in many cases lie in the design of workflows and workplaces. These causes include excessive ambient noise levels, improper lighting, incorrect postures, excessive workloads, inappropriate pacing, and the tasks to be

performed (Eklund, 1997). Poor physical and cognitive ergonomics have been found to increase errors and decrease product quality (Falck et al., 2014; Rosenqvist et al., 2014).

Kolus et al. (2018) conducted a literature review to develop a conceptual framework that linked human factors engineering with production quality. The resulting framework shows the relationships between poor ergonomic job design, the development of fatigue in operators, and resulting production errors. This examination of the empirical evidence found that quality deficits were associated with undesirable human effects of workload, such as fatigue and injury-related risk factors. Similarly, a more recent review of the fatigue-quality relationship (using the same dataset) showed more precisely a positive correlation between fatigue and quality deficits (Yung et al., 2020).

According to Williamson et al. (2011), fatigue is considered a construct, linking a range of factors that presumably cause fatigue with several performance outcomes. These authors also mentioned that fatigue may take several forms, including sleepiness and mental, physical, or muscular fatigue, depending on the nature of its cause. More recently, Yung et al. (2020) grouped fatigue into three main categories: (1) cognitive/mental/central, (2) physical/neuromuscular/peripheral, and (3) perceptual/visual. However, regardless of the different categories, all forms of fatigue can reduce performance capabilities (Barker et Nussbaum, 2011; Fan et Smith, 2017; Lamond et Dawson, 1999).

The definition of fatigue that we used in this article is as follows: “A physiological condition characterized by a decline in mental or physical abilities due to chronobiological factors (lack of sleep, prolonged wakefulness, or circadian rhythm) or mental or physical workload that can impair worker performance by decreasing the ability to perform a task safely or the ability to achieve expected results in terms of quality or productivity.” This is an adaptation of the definition initially proposed by the International Civil Aviation Organization (ICAO, 2019). General fatigue and workload, particularly mental workload, have been studied extensively in safety-critical contexts wherein the degradation of human performance can lead to catastrophic

outcomes, such as nuclear energy production, aviation, and the petrochemical industry. In manufacturing, however, it seems that the physical demands of the job have received most of the attention (Bruder et al., 2009) because of the prevalence of musculoskeletal disorders (Bao, 2015; Yang et al., 2020) associated with a relatively high level of physical activity. As a result, improvements in manufacturing ergonomics have often focused on reducing biomechanical loads, such as non-neutral postures, repetitive movements, high static muscle loads, high-force exertions. Fatigue evaluation has also focused on the physical aspects of manufacturing (Bosch et al., 2011; Glock et al., 2019; Yung et al., 2020). The relationship between fatigue and chronobiological aspects of work, such as working long hours or night shifts, seems to have attracted less attention, especially outside of safety-critical domains.

A similar observation can be made about mental workload. The evaluation of complexity in assembly, including the development of tools to measure it, has received much more attention than mental workload as such (Falek et al., 2016; Zhu et al., 2008). Still, a handful of studies have evaluated mental workload in manufacturing using subjective assessment methods, such as the NASA-TLX (Puspawardhani et al., 2016). Others have explored the relationship between workload and fatigue (Hernandez Arellano et al., 2015). More recently, Thorvald et al. (2019) have proposed a method for cognitive load assessment that seems to indicate a growing interest in the cognitive aspects of manual assembly. Additional research in this area is warranted, given that the proportion of complex assembly tasks that involve relatively high cognitive demands are expected to grow compared to physically strenuous work, as the result of technological transformations associated with Industry 4.0 (Kong, 2019).

In the present study, we aimed to evaluate self-reported levels of fatigue and workload by a group of workers conducting complex assembly tasks in a real manufacturing setting. We investigate several predictors of fatigue, including workload estimates, sleep duration, the shift being worked, and production levels. The underlying assumption is that both workload and fatigue impair performance (Fan et Smith, 2017). In the context of this study, ‘complex manual assembly’ means tasks that require specialized knowledge and skills from the worker. For

example, the assembled object may include a large number of parts, which may be assembled in multiple configuration options, along several symmetric planes of assembly (Richardson et al., 2006). This type of work requires a relatively high cognitive commitment on the part of the worker, including sustained attention, information retrieval, information processing, reasoning, decision-making, and understanding (Landau et al., 2003). The conceptual debate surrounding the various definitions of complexity is beyond the scope of this article and can be found in the literature (Falck et al., 2016; Frizelle et Woodcock, 1995b; Kuzgunkaya et ElMaraghy, 2006)

4.2 Methods

4.2.1 Participants

Fourteen volunteer participants were recruited in-person by the research team. Participants worked on an assembly line at which they performed complex mechanical assembly tasks. Instructions were delivered by the manufacturing execution system and displayed on a computer terminal at the workbench, which is located approximately two meters from the assembly position. Instructions consisted of text and 2D drawings providing basic visual descriptions of assembly steps. Tools were located in a tool cabinet near the assembly position. All participants were males, with a mean age of 43.6 years (SD: 11.4) and mean of 15 years of experience (SD: 12.8). Most of the participants (80%) were experienced assemblers (>3 years) aged 35 years old or more. Only three participants had less than one year of experience. All workers had an equal opportunity to participate in the study regardless of their gender. However, the study was carried out in a predominantly male environment where fewer than 10% of workers were women, which impeded diversity in recruitment. All participants provided written consent prior to engaging with the study. The research project was approved by the École de technologie supérieure research ethics committee.

4.2.2 Procedure

Data were collected over the last week of a month and the first week of the following month for 10 consecutive workdays. This period was selected to reflect the variation in workloads between weeks of high and low production volume; production demand was 60% higher during the first week of the study (week 1), compared to the next (week 2). We were able to obtain data reflecting a total of 114 work shifts, which represented a response rate of approximately 90% from the participants. Workers evaluated their fatigue levels twice per shift, at the beginning and at the end of the shift, using the Samn-Perelli Fatigue Scale (Samn et Perelli, 1982). Workload was evaluated at the end of each shift, using NASA-TLX (Hart et Staveland, 1988). Workers also reported their bedtimes and waking times, which were used to calculate how much sleep they got before each shift. Two shifts were involved in the study: morning shift (6h30-14h30) and evening shift (14h30-00h30). Morning shift consists of five days of work per week, for a duration of 8 hours per day, while evening shift consists of four 10-hour days. Workers spent one week working the evening shift for every three weeks in the morning shift. The distribution of participants according to the week and shift studied is shown in Table 4.1.

Tableau 4.1 Distribution of participants by week and shift

	Week 1	Week 2
Morning Shift	8 (57%)	10 (70%)
Evening Shift	6 (43%)	4 (30%)

In the present study, subjective measures of fatigue and workload were preferable because of the empirical nature of the research and the difficulty in obtaining objective data about fatigue and workload in a real manufacturing setting. An advantage of subjective methods is that they are relatively easy to administer, with minimal interruption to workers (Gomes de Carvalho et al., 2021). Further, fatigue and workload are considered to be theoretical constructs that are

essentially multidimensional. Yet, it is unclear whether a single objective measure of constructs is desirable, having both subjective and physical components (Annett, 2002).

4.2.3 Evaluation of fatigue

Participants rated their levels of fatigue before and after each shift, using the Samn–Perelli Seven-Point Fatigue Scale (SPFS), using a paper and pencil form (Samn et Perelli, 1982). The seven points in the SPFS are as follow: 1 = Fully alert, wide awake; 2 = Very lively, responsive, but not at peak; 3 = Okay, somewhat fresh; 4 = A little tired, less than fresh; 5 = Moderately tired, let down; 6 = Extremely tired, very difficult to concentrate; and 7 = Completely exhausted, unable to function effectively. Other subjective scales have been used for the evaluation of fatigue, such as Borg's CR-10 scale (Borg, 1982), the Karolinska sleepiness scale (KSS) (Åkerstedt et Gillberg, 1990) and the Swedish Occupational Fatigue Inventory (Åhsberg et al., 1997).

We preferred the SPFS because of its simplicity. As a one-dimension scale, SPFS can be used repeatedly in the field with ease and in conjunction with other subjective evaluation methods. Also, the focus of the research was on complex manual assembly where physical demands are low to moderate. The SPFS has been used frequently in studies of self-reported levels of fatigue among commercial and military pilots (Honn et al., 2016; Neville et al., 1994), railroad workers (Dorrian et al., 2011), aircraft de-icing technicians (Torres et al., 2016), and manufacturing workers (Binoosh et al., 2017). The scale has demonstrated good reliability in test–retest scenarios and has been found sensitive to variations in fatigue throughout the workday (Miller et Narvaez, 1986). The scale's designers further defined four fatigue classes and their predicted effects on performance, with Class I and Class II being associated with significant performance degradation (Table 4.2). For this reason, the value 5, which constitutes the lower bound of Class II, is considered a critical threshold in civilian aviation (UK-CAA, 2007). In the present study, levels of fatigue high sufficient to compromise performance (fatigue score ≥ 5 :

moderate/severe fatigue) were considered as “high fatigue”. Thus, the value 5 on the SPFS was used as the critical threshold serving to dichotomize the fatigue scale for statistical analysis.

Tableau 4.2 Fatigue classes and Predicted Effect of Fatigue on Performance
Tiré de Samn et Perelli (1982, p. 5)

Fatigue Class	SPFS Scores	Predicted Effect of Fatigue on Performance
IV	1-3	Sufficiently alert. No performance impairment due to fatigue.
III	4	Mild fatigue. Performance impairment possible but not significant.
II	5-6	Moderate to severe fatigue. Some performance impairment probably occurring. Flying duty permissible but not recommended
I	7	Severe fatigue. Performance definitely impaired. Flying duties not recommended. Safety of the flight in jeopardy.

4.2.4 Evaluation of workload

Workload was assessed using the NASA-TLX test, which was developed by the Human Performance Group at NASA’s Ames Research Center, in the United States (Hart et Staveland, 1988). This method has been validated and is widely used for evaluating subjective workload (Hart, 2006; Mansikka et al., 2019; Noyes et Bruneau, 2007; Rubio et al., 2004). Subjective metrics elicit the operator’s perception of the demands of the system (Tsang, 2006). NASA-TLX assesses workload along six “dimensions”. Three of these dimensions measure the mental, physical, and temporal demands imposed upon the subject. The three other dimensions measure how the subject evaluates their performance, effort, and frustration level regarding the task at hand (Hart et Staveland, 1988). Each of the six dimensions is represented by a scale divided into 20 intervals, marked at each end as ‘Low’ and ‘High’ or ‘Good’ and ‘Poor’. In this study, a score between 0 and 100 (rounded to the nearest 5) was extracted from each of the six scales; the scores were then summed to provide a unidimensional NASA-TLX rating. The scores were not weighted. This combined rating is known as the Raw-TLX, and it is both easy

to apply (Hart, 2006) and reliably valid (Karran et al., 2019; Mansikka et al., 2019; Said et al., 2020) in real-life settings.

Here, workload is considered as the cost incurred by a human operator to achieve a particular level of performance (Hart et Staveland, 1988). It was thus not considered as an external phenomenon; instead, it emerges from the interaction between the requirements of a task, the circumstances under which it is performed, and the operator's skills, behaviors, and perceptions. This is the view underlying the NASA TLX method. The conceptual debate about the different approaches to workload (e.g., physical, mental, objective, subjective) is beyond the scope of this manuscript. Readers are invited to consult classic works by Leplat and Sperandio (1967), Rohmert and Laurig (1975), as well as more recent reflections about the topic of workload in the human factors/ergonomics (HF/E) discipline by Young et al. (2015).

4.2.5 Statistical analysis

Fatigue and workload ratings were the two main dependent variables of interest, and they were represented by interval rating scales (Hart et Staveland, 1988; Samn et Perelli, 1982). Means and standard deviations were selected as measures of central tendency and dispersion, respectively. Two-sample t-tests were used when groups of data came from different populations, while the paired-sample t-test (aka: dependent sample t-test) was used when groups of data came from the same population, such as fatigue before shifts and fatigue after shifts. Predictors of high fatigue (i.e., of reporting a level of fatigue of 5 or higher on the Samn-Perelli Fatigue scale) were identified using binary logistic regression (Samn et Perelli, 1982). Norman (2010) has shown that the robustness of the parametric t-test makes it a suitable choice even with ordinal data or when the data do not fulfill the usual assumptions regarding sample size and normality. Stiger et al. (1998) have further demonstrated the validity of parametric tests, especially given that nonparametric tests remain very scarce and poorly understood. The literature also includes a number of studies that apply parametric statistics, such as ANOVA and t-tests, to the Samn-Perelli Fatigue Scale and to NASA-TLX (Dorrian et al., 2011; Noyes

et Bruneau, 2007; Powell et al., 2011). For a more detailed comparison of t-tests and nonparametric tests, see Fagerland (2012). The significance level for the inference tests was set at 0.05, a common threshold in the scientific literature (Riffenburgh, 2012).

4.3 Results

The mean reported duration of sleep, over the 114 nights recorded, was 6.52 hours (Min: 3, Max: 10, SD: 1.14). A further breakdown of sleep duration shows that workers reported less than seven hours of sleep, which is the amount recommended by scientific consensus for good health and optimal performance (Watson Nathaniel et al., 2015), in 60% of cases; and six hours or less in 21% of cases (Figure 4.1).

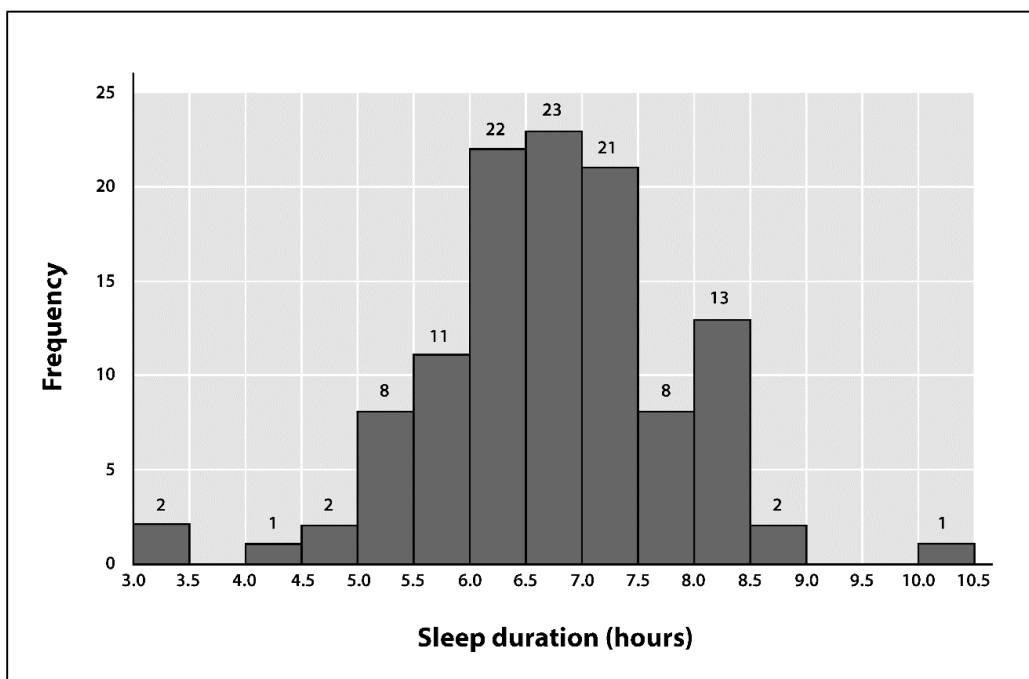


Figure 4.1 Breakdown of reported sleep duration

While it would seem reasonable to assume that sleep duration might be affected by the time at which a shift begins, statistical analysis showed that, although the mean reported amount of sleep was slightly lower for the morning shift in comparison with the evening shift (6.49 vs. 6.63), the difference was not statistically significant ($P: 0.651$). However, the mean fatigue

score reported by the workers increased significantly from 2.75 before a shift to 3.78 at the end of the shift, which shows a likely effect of the job on fatigue (Table 4.3).

Tableau 4.3 Results from inferential statistics analysis using t-tests

Variable	Factor	<i>N</i>	Mean	SD	<i>P</i>
<i>Sleep duration</i>	Morning	82	6.49	0.93	0.651
	Evening	32	6.63	1.62	
<i>Fatigue</i>	Before work	114	2.75	1.29	<0.001
	After work	114	3.78	1.26	

The distributions of baseline fatigue scores before a shift and of accumulated fatigue at the end of the workday are shown in Figure 2. No participant reported extreme fatigue, which is scored as a 7 on the SPFS scale. Results show that the critical threshold, a value of 5, was reached or exceeded in 31.6% of the shifts, divided between 20 morning shifts and 16 evening shifts. Workers reported baseline fatigues of 5 or more at the beginning of a shift in only 8.8% of cases (7 mornings, 3 evenings). These values were not reported on particular days of the work week (e.g., towards the end of the week), nor were they associated with particular individuals. However, in all 10 cases, workers also reported getting six hours of sleep or less the night before. As shown in Figure 4.2, by the end of the workday fatigue scores reported by workers tended to switch from lower values to higher values as a logical result of the cumulative effect of fatigue.

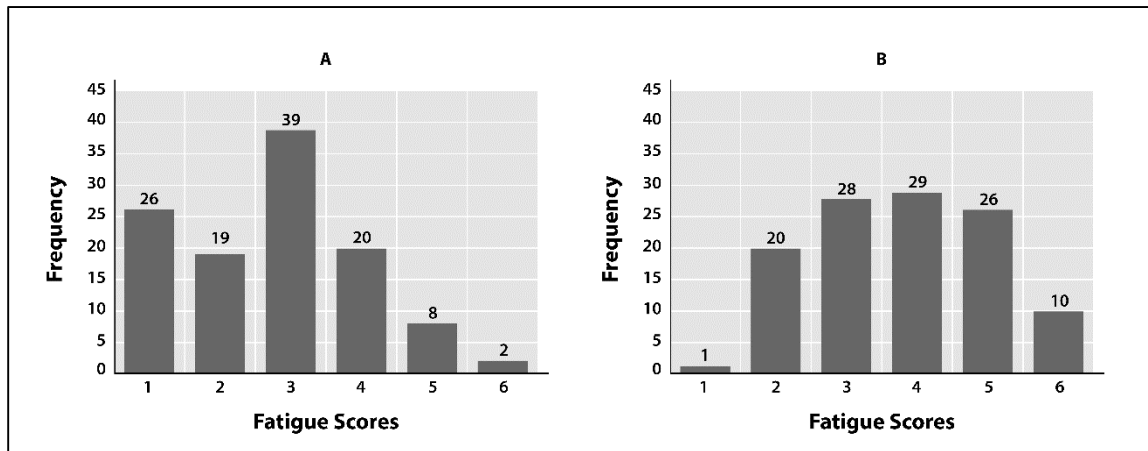


Figure 4.2 Distributions of reported fatigue scores before (A) and after (B) a work shift

Binary logistic regression (dependent variable: fatigue score ≥ 5 , yes/no) for longitudinal data indicated that baseline fatigue before a shift, NASA-TLX score, and working the evening shift were significant predictors ($p < 0.05$) of high levels of fatigue at the end of a shift (Table 3). Sleep duration, however, was not a significant predictor; neither was the week, even though production levels changed considerably from one week to the next (week 1 of the study had 60% higher production volume than week 2). The odds ratio for working the evening shift, as a predictor of high levels of fatigue, was particularly high compared with the other predictors (Table 4.4).

Tableau 4.4 Results from binary logistic regression for the major variables under study

Predictor	Coef.	Z-Value	Odds ratios	95% CI	P-Value
Sleep duration	0.219932	0.98	1.25	(0.80; 1.94)	0.33
Fatigue before	0.553913	2.52	1.74	(1.13; 2.68)	0.01
NASA-TLX	0.0072184	2.05	1.01	(1.0; 1.01)	0.04
Week-2	0.335583	0.67	1.40	(0.52; 3.75)	0.51
Shift-evening	1.85483	3.19	6.39	(2.04; 19.99)	<0.001

Figure 4.3 shows the six dimensions of the NASA-TLX workload as perceived by workers. Mental demand had the highest mean value among the six dimensions, with 51.8 (SD: 19.4).

The difference between mental demand and physical demands was statistically significant (p-value: <0.001).

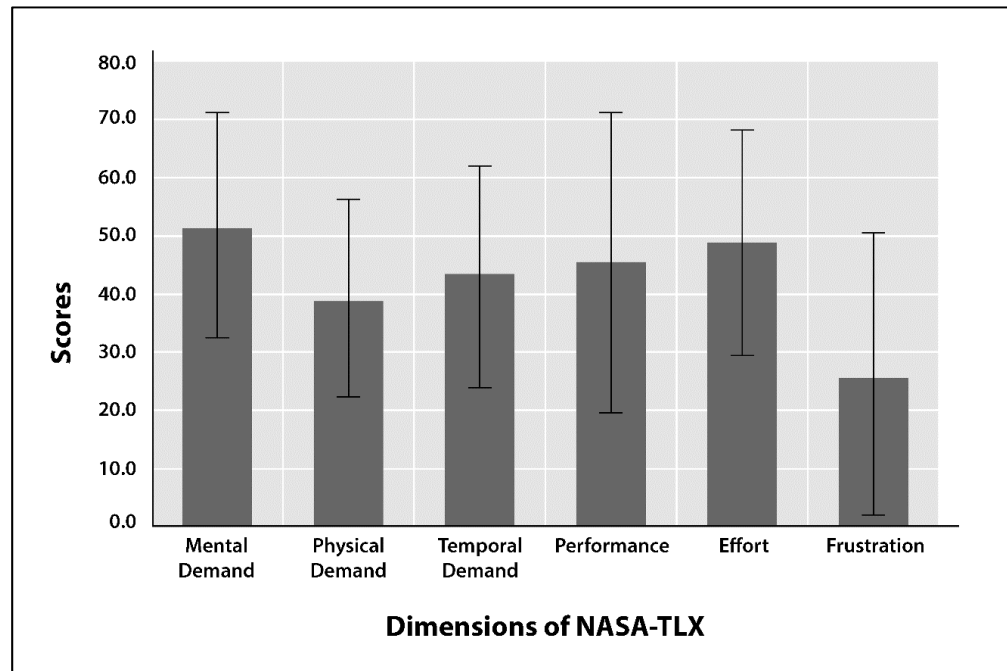


Figure 4.3 Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX as evaluated by workers

After stratifying the six dimensions of the NASA-TLX by type of shift, the differences in all dimensions, except physical demand, were statistically significant (Figure 4.4). However, when stratifying the same dimensions by type of week, only the difference in effort was found to be statistically significant (Figure 4.5).

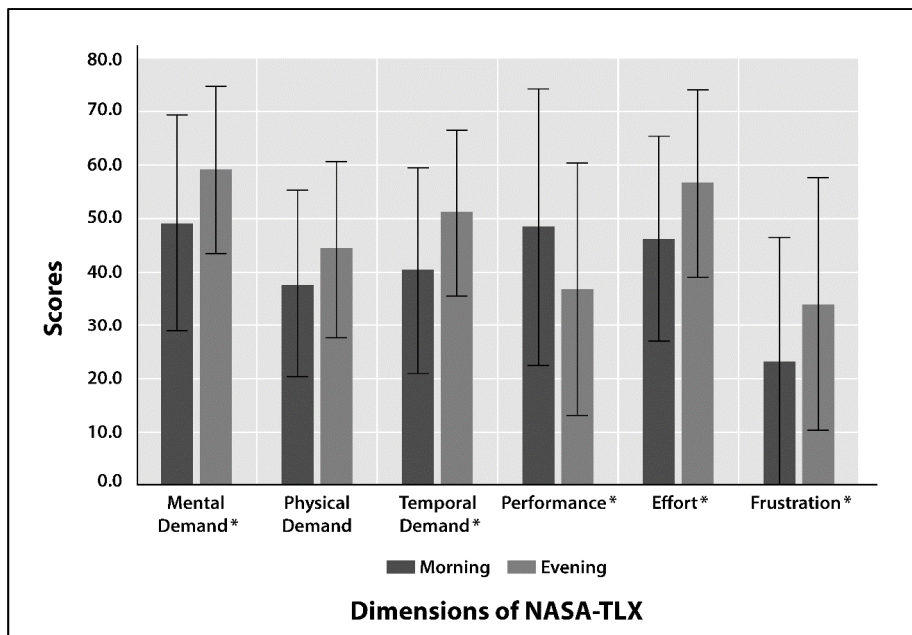


Figure 4.4 Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX stratified by shift. The symbol * indicates a statistically significant difference (p-value ≤ 0.05)

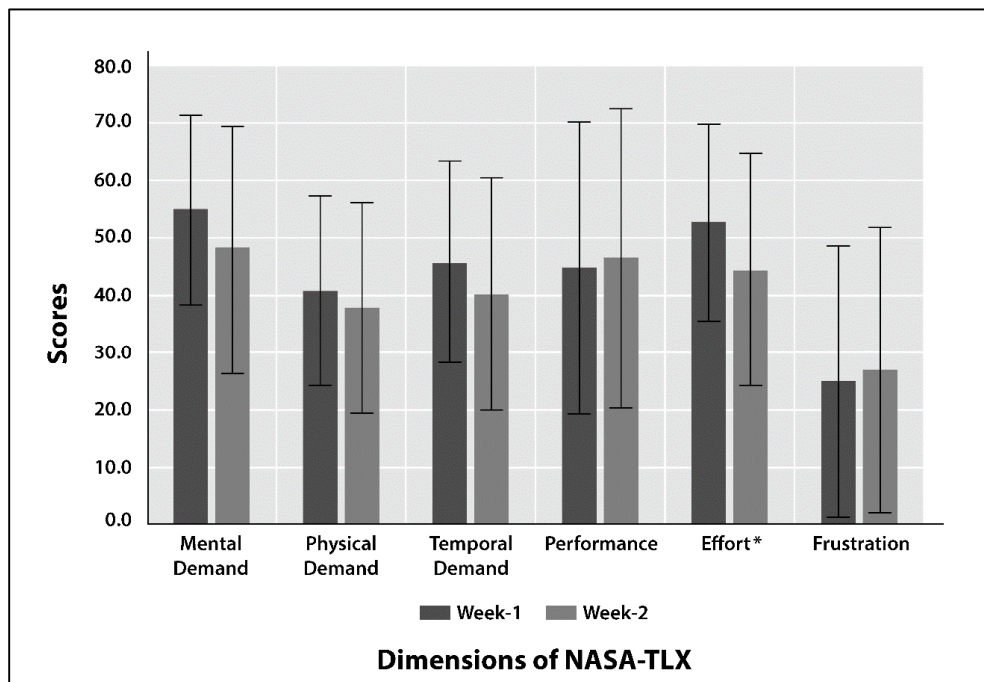


Figure 4.5 Means and standard deviations (error bars) of the six components of the NASA-TLX stratified by week. The symbol * indicates a statistically significant difference (p-value ≤ 0.05)

The influence of the six NASA-TLX dimensions on high levels of fatigue was also explored using binary logistic regression (dependent variable: fatigue score ≥ 5 , yes/no). The objective was to increase the level of granularity in the analysis of the relationship between workload perception and high level of fatigue, as reported by workers at the end of a shift. Results show that only mental demands (odds ratio: 1.04; p-value: 0.018) and frustration (odds ratio: 1.03; p-value: 0.005) were significantly related to high fatigue (Table 4.5).

Tableau 4.5. Results from binary logistic regression for the six dimensions of NASA-TLX

Predictor	Coef.	Z-Value	Odds ratios	95% CI	P-Value
Mental Demand	0.0395804	2.36	1.04	(1.01; 1.08)	0.018
Physical Demand	-0.0237183	-1.48	0.98	(0.95; 1.01)	0.140
Temporal Demand	-0.0083849	-0.53	0.99	(0.96; 1.02)	0.593
Performance	-0.0017557	-0.18	1.00	(0.98; 1.02)	0.857
Effort	0.0113081	0.66	1.01	(0.98; 1.05)	0.507
Frustration	0.0262645	2.83	1.03	(1.01; 1.05)	0.005

4.4 Discussion

4.4.1 Fatigue scores

The mean value for fatigue after a shift was 3.78 (SD: 1.26) on the Samn-Perelli Fatigue Scale (SPFS), and no employee reported the maximum value of 7. This mean value is lower than values reported by Dorrian et al. (2011) among Australian railway workers, which was 4.0 (SD: 1.3), and by Torres et al. (2016) among aircraft de-icing technicians, which was 4.1 (SD: 1.0). It is also lower than results from Powell et al. (2011), who studied fatigue in airline pilots. These latter authors reported no mean scores above 5.0 for any of the flight routes under examination, even the longest ones, which scored a 4.81 (SD:0.56). Finally, Binoosh et al. (2017) obtained a SPFS mean value of 5.77 (SD: 0.57), which is considerably higher than the

results obtained here (3.78 vs. 5.77). However, in the study by Binoosh et al. (2017) workers performed physically demanding assembly tasks (overhead assembly of submersible pumps), which differ from the situation under study here (i.e., complex manual assembly). Globally, the mean value of self-reported fatigue found in the present study is below the values reported in the several studies mentioned above. Still, differences in self-reported fatigue are expected due to variations in job profiles and workloads among the various studies cited.

Similarly, it has been pointed out that the mean rating in fatigue studies may not be very helpful when it comes to evaluating actual risk (UK-CAA, 2007). According to a report published by the United Kingdom Civil Aviation Authority (UK-CAA, 2007), “the concern that arises when mean levels of fatigue rise to a moderately high level, is not that the mean level itself is unacceptably high, but that the probability of an extremely high level in a subgroup of individuals is much increased.” In the current study, 32% of shifts yielded values above the critical threshold value of 5 on the SPFS scale. This occurred in a total of 36 shifts (20 mornings, 16 evenings), during which performance may have been degraded due to excessive fatigue. Dorrian et al. (2011) also followed an approach based on exceeding a critical threshold, using 6 on the SPFS scale as their critical threshold value. However, according to Samn-Perelli’s original work (Samn et Perelli, 1982), the values 5 and 6 on the SPFS scale belong to the same category when assessing job performance degradation (Category II). This is why we adopted 5 and not 6 as the threshold.

4.4.2 Predictors of fatigue

Binary logistic regression showed that baseline fatigue scores, NASA-TLX scores, and the evening shift were significant predictors of high levels of fatigue at the end of the workday (fatigue score ≥ 5). This result indicates that an increase in fatigue scores at the beginning of the shift, or an increase in the NASA-TLX scores, will increase the probability of reporting high fatigue at the end of the workday. Similarly, working the evening shift is associated with an increase in the likelihood of reporting high fatigue at the end of the workday.

That the baseline level of fatigue at the beginning of a workday would be a predictor of fatigue at the end of the workday seems like a trivial observation. Multiple factors, however, can contribute to high baseline levels of fatigue. Lack of sleep is one of them; while sleep duration, by itself, did not prove to be a significant predictor of high levels of fatigue at the end of the shift, it may have an indirect influence through an increase in baseline fatigue. We found a moderate, inverse correlation between sleep duration and baseline fatigue ($r: -0.41$; $p\text{-value}: <0.001$); specifically, the less workers sleep, the more tired they claim to be at the beginning of a shift, supporting this hypothesis. Furthermore, in all 10 cases where baseline fatigue was 5 or 6 on the SPFS, workers also reported having slept six hours or less. This reinforces the evidence about the possible influence of sleep deficiency on baseline levels of fatigue.

As for why working the evening shift proved to be a predictor of high levels of fatigue, we propose two possible explanations. First, the evening shift is two hours longer than the morning shift, which translates to 25% more time spent working. Spencer et al. (2006) have already shown that the duration of a shift influences the reported level of fatigue; their model, based on several studies of air and rail crews, indicated an increase of about 0.14 in SPFS scores per additional hour of work. Second, homeostatic and circadian processes, colloquially known as the “biological clock” (Boivin et Boudreau, 2014), can also contribute to higher levels of reported fatigue, with the worst-case scenario being a long overnight shift that ends in the morning (Boudreau et al., 2018). In our study, the evening shift ended at 00h30, a time when humans are supposed to be asleep, whereas the morning shift ended at 14h30.

When planning work schedules, management should consider factors such as hours of work, start times, end times, and other factors such as rest breaks between and within shifts, shift sequences, and work demands (Wong et al., 2019). For detailed guidelines on work schedule planning, readers are invited to consult the consensus statement from the Working Time Society entitled: “A multi-level approach to managing occupational sleep-related fatigue” (Wong et al., 2019). In addition, another consensus statement from the same society – “Prescriptive rule sets and risk management-based approaches for the management of fatigue-

related risk in working time arrangement” (Honn et al., 2019b) – can provide further guidelines to prevent excessive build-up of fatigue.

Finally, our finding that NASA-TLX scores predicted high levels of fatigue corroborates the idea, already discussed in the literature, that workload is a contributing factor to fatigue (Fan et Smith, 2017). However, what seems most relevant to discuss is which of the six dimensions that make up the NASA-TLX influence fatigue in ways that can potentially degrade human performance. Binary logistic regression showed that mental demands and frustration were both statistically significant predictors of high levels of fatigue. Furthermore, mental demands had the highest recorded mean value among the six dimensions of the NASA-TLX, and the difference between the reported scores for mental and physical demands was statistically significant. These results highlight the importance of the cognitive aspects of work when dealing with complex manual assembly.

Engineers, managers, and supervisors may address cognitive ergonomics as a strategy to reduce fatigue in complex assembly. For example, some initiatives to ease assembler’s mental workload could include optimizing work instructions content (Li et al., 2018) and developing perceptually engaging assembly instructions, such as by using three-dimensional models (Geng et al., 2015). In addition, work instructions should clearly and unambiguously describe which components to use and how they should be assembled to avoid information processing overload (Mattsson et al., 2018b). Similarly, parts kitting, a logistics technique to deliver parts to workstations, can support workers and even facilitate learning (Brolin et al., 2017; Medbo, 2003). Some other initiatives to explore include developing easy-to-assemble solutions during product development (Blais, 2011; Boothroyd, 1996) or the use of more recent technologies like augmented reality (AR) and collaborative robots to support workers performance (Mattsson et al., 2018a).

4.4.3 Fatigue and sleep

Fatigue is a complex phenomenon affected by many factors within and beyond the workplace. Insufficient sleep has long been associated with shift work (Knauth et al., 1980; PCIAOH, 1981), and more recent studies corroborate the influence of inadequate sleep on health problems (Boivin et Boudreau, 2014; Moreno et al., 2019) and decreased work performance (Honn et al., 2019a). Sleep is often truncated on the night before an early morning shift (Folkard et al., 2007; Ingre et al., 2008), and the earlier the work begins, the harder it becomes to get enough sleep because of conflicting social and domestic demands or because of the body's biological clock (Folkard et Barton, 1993). For example, Folkard, et al. (2007) estimated that shifts that begin between 5:00 and 7:00 in the morning result in a loss of between one and two hours of sleep. Late shifts have a similarly deleterious effect: Spencer et al. (2006) discussed research that found that workers average only 6.40 hours of sleep after shifts ending between midnight and 2:00am. Interestingly, this value is close to the mean sleep duration reported by individuals working the evening shift in our study (i.e., 6.63 hours).

Overall, our results show that the mean sleep duration for morning and evening shifts was below the seven hours recommended as a minimum for good sleep hygiene (Watson Nathaniel et al., 2015; Wong et al., 2019), and the difference between shifts was not statistically significant (6.49 vs. 6.63). Further, workers slept fewer than seven hours on 60% of nights and fewer than six hours on 21% of nights.

It should be noted that workers on standard daytime schedules have also reported insufficient sleep. For example, Skinner and Dorrian et al. (2015) observed, in a study of 573 daytime workers, that 26.4% rarely or never slept the recommended seven hours. Indeed, 35.2% of all adults in the United States sleep less than seven hours a night on average (CDC, 2017). This could indicate the existence of endemic sleep deprivation, unrelated to shift work. Thus, the difference between the results of the present study and the results reported by Skinner and

Dorrian et al. (2015) could be explained by the incremental effect of shift work on sleep, in comparison with standard daytime schedules.

Sleep is generally recognized as a primary mediator of performance, independent of shift work configuration (Ferguson et al., 2011). Not only “sleep duration” but also “sleep quality” is considered to be a predictor of fatigue (Yilmaz et al., 2017). Factors including poor sleep habits, stress and anxiety, chronic health conditions, or sleep disorders (e.g., sleep apnea and narcolepsy) can affect how well a person sleeps (Harvey et al., 2008), potentially affecting performance. According to a recent literature review by Redeker et al. (2019), the most common solutions to promote sleep health and manage alertness in the workplace include educational programs that stress sleep hygiene and fatigue management, napping practices, and adjustments to environmental parameters such as lighting and temperature. It has also been shown that workers themselves frequently rely on behavioral strategies to cope with sleepiness and fatigue (Sagah Zadeh et al., 2017). These include dietary strategies such as the consumption of caffeine, food, and other beverages; physical activity such as taking a short walk or other forms of exercise; workplace strategies such as increasing the level of activity or trading tasks; and enhanced sensory stimulation through lighting, temperature, music, or engagement with coworkers. According to Redeker et al.’s (2019) literature review, employers’ efforts to encourage sleep hygiene and healthier habits typically result in longer and better sleep and in fewer self-reported sleepiness complaints. Nevertheless, since all of these initiatives require adjustments to ingrained behaviours, shift work disruption of sleep patterns may remain a significant issue as long as shift work remains a common practice.

4.4.4 Limitations of the study and future research

There are several limitations to the current study that must be noted. We used subjective assessment methods, which may suffer from an inherent bias linked to human judgment. For example, self-assessment reports can be misleading due to the participants’ desire to respond ‘correctly’ or, in some cases, their lack of interest in the study (May et Kline, 1988). Future

work should add objective performance indicators to the scope of the analysis, such as statistics on quality issues, deviations from the expected output, and near misses. It may also be beneficial to include some metrics of assembly complexity. Additionally, since participation was entirely voluntary, there was no way to control for representativeness. This, combined with the sample's relatively small size, means that our statistical analysis could not explore the potential influence of several other variables, such as gender, age or seniority. However, it is reasonable to expect that these variables may influence the results of the statistical analysis. For example, according to the Rasmussen SRK model of human performance (Rasmussen, 1983), cognitive resources needed to perform a complex work task depend on how experienced the worker is. Thus, future studies, including more participants and more diversity in participation, should explore the influence of these demographic variables.

The day-to-day cumulative process associated with fatigue was not within the scope of the study. However, fatigue and sleep can accumulate over days (e.g., sleep debt). Additionally, recent shift changes may be associated with sleep disturbances. Future research should explore this cumulative effect on fatigue in more detail and the potential impact of recent shift changes on the results, including the relation with sleep debt. Similarly, data associated with sleep quality could be collected in addition to data on sleep duration. This may allow investigators to evaluate the efficiency of sleep as another variable that may influence levels of fatigue.

As previously presented in this manuscript, the statistical analysis highlights the importance of the mental demand of work as a predictor of high fatigue. However, the intended populations for which the Samn-Perelli Fatigue Scale was designed were pilots and aircrew. Thus, the development of the scale placed more emphasis on fatigue reports related to work-rest cycles, sleep duration, physiological parameters, circadian rhythms, and environmental stressors, and less on the physical demand of the job (Samn et Perelli, 1982). For this reason, SPFS might be less sensitive to the physical demands of the job. In cases where the job's physical demands are significant, the use of the SPFS may not be completely adequate. However, the SPFS was

selected because the focus of the study was on complex manual assembly where physical demands are low to moderate.

4.5 Conclusion

Scores of 5 or more on the Samn-Perelli Fatigue Scale (SPFS), which represent a level of fatigue high enough to potentially affect performance, were reported in one-third of the shifts observed over the course of this study. We also found that cognitive exertion could cause fatigue in complex manual assembly contexts. Indeed, “mental demand” was found to be the best predictor of high levels of fatigue among the six dimensions measured by NASA-TLX. Thus, interventions to improve assembly worker performance in cognitively demanding tasks may reduce fatigue by focusing on task complexity, information processing, the improvement of work instructions, and the use of technologies to support human cognitive abilities.

Our results also showed that working the evening shift (14h30-00h30) was a significant predictor of high levels of fatigue. Additionally, workers reported getting fewer than the recommended seven hours of sleep on 60% of nights and fewer than six hours on one-fifth of the nights, while the difference between shifts was not statistically significant. The start time of the morning shift (6h30) and the end time of the evening shift (00h30) may be affecting the amount of sleep reported by workers and consequently the reported levels of baseline fatigue. Thus, in contexts that require shift work or otherwise atypical work schedules, attention should be paid to chronobiological sources of fatigue, such as circadian and homeostatic processes that vary with shift length, start time, and end time. This implies that management should take factors such as shift duration, start times, end times, breaks, and the number of consecutive shifts into consideration when planning work schedules, including the allocation of overtime. Employers may also want to encourage sleep hygiene through educational programs that stress healthier habits as a part of a fatigue risk management system.

Finally, our results and conclusions regarding the drivers of fatigue should be interpreted in the light of the specific case presented in this manuscript: high complexity, modest physical workload, a single site. Work systems with a different mix of physical, emotional, or cognitive demands can be expected to show different or additional drivers of self-reported fatigue. Future research should expand the scope of the analysis (more sites, more participants, greater number of variables collected) to reach more generalizable conclusions.

CHAPITRE 5

ARTICLE 3: APPLYING ACCIMAP AND STAMP TO THE ANALYSIS OF HUMAN ERROR IN COMPLEX MANUAL ASSEMBLY

Yaniel Torres ^a, Sylvie Nadeau ^a and Kurt Landau ^{a,b}

^a Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure (ÉTS), 1100 Notre-Dame St W, Montreal, QC H3C 1K3, Canada.

^b Institute of Ergonomics and Human Factors, Technische Universität Darmstadt, Otto-Berndt-Straße 2, 6429764287, Darmstadt, Germany.

Article accepté dans Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries
<https://onlinelibrary.wiley.com/journal/15206564>

Abstract

In sectors such as aerospace manufacturing, human errors in the assembly of complex products can negatively impact quality, productivity, and safety. Until now, the analysis of assembly errors has focused more on the immediate human-system interface and less on broader organizational factors. This paper presents a case study-based analysis of assembly errors in the aeronautical industry using the systemic methods AcciMap and STAMP. We seek to provide the company with elements to build a quality improvement strategy that considers human factors and ergonomics from a systemic perspective. The data and information necessary to conduct the analysis came from a project carried out at an aerospace manufacturing facility over a period of 12 months. The team had direct and recurrent access to primary data sources and communication with various stakeholders. A total of 31 influencing factors were identified with AcciMap at different levels within the manufacturing system. STAMP made it possible to model the sociotechnical control structure of the assembly process and identify several control flaws leading to hazards. The analysis shows that systemic methods require a high level of understanding of the manufacturing system and access to relatively high amounts of data and information. Therefore, direct contact with the field and

stakeholders is crucial. Training quality specialists on systemic methods could support its use and help to close the gap between theory and practice. Globally, the field of quality in manufacturing could benefit from using systemic methods when deemed necessary.

5.1 Introduction

Despite the historical trend to increase automation in manufacturing (Dinlersoz et Wolf, 2018), manual assembly systems still play an essential role, particularly in some contexts where there is a high level of complexity and variety in production. This is the case in the aerospace industry which heavily relies on human work (Alogla et Alruqi, 2021; Beuß et al., 2019; Judt et al., 2020). Even as the proportion of monotonous and repetitive tasks continues to decline because of automation, we can expect that complex manual assembly will still need a human's skills set. Unfortunately, manual operations are subject to human errors, which generate quality deficiencies and productivity losses (Falck et al., 2014; Richards, 2018). From a lean manufacturing perspective, these quality deficiencies represent waste that needs to be eliminated or reduced to minimize costs and delays (Gupta et Jain, 2013). One approach that has been explored to eliminate or reduce error-related quality deficiencies has been the application of the human factors and ergonomics (HF/E) discipline in conjunction with the lean approach (Wong et al., 2009). Indeed, the relationship between ergonomics and quality in manufacturing has been recognized in the literature (Eklund, 1999; Falck et al., 2010; Kolus et al., 2018). However, so far, much of the work of HF/E specialists, to analyze the origins of error-related quality deficiencies, has focused on improving the immediate human-system interface and relatively less on broader organizational factors. Evidence of this can be found in several recent studies where the human reliability analysis (HRA) approach was used to identify and quantify assembly errors (Blackert et al., 2019; Böllhoff et al., 2016; Caputo et al., 2017; Pasquale et al., 2018; Torres et al., 2021b). As a result, more recent systems thinking-based risk assessment methods have been given less consideration when analyzing error-related quality deficiencies in manufacturing environments. Notwithstanding, these methods can be instrumental in complex socio-technical systems like aerospace manufacturing, which

produce some of the most complex and specialized products made by humans (Amir et Weiss, 2019). The manufacture of these complex products requires the confluence of multiple highly specialized companies, both suppliers and integrators (Cagli et al., 2012).

An effective strategy used in manufacturing to prevent assembly errors is the reduction of product complexity during the design phase. This is usually achieved by using Design for Assembly (DFA), a cost-reduction engineering methodology that seeks to minimize the part count and the number of assembly operations needed (Boothroyd, 1994). DFA can also lead to better quality by reducing the number of ‘opportunities to fail’ in any assembly operation (Kent, 2016). Similarly, using error-proofing principles (poka-yoke) is a well-established strategy for reducing assembly errors (Blais, 2011). However, the ease of assembly is not the only parameter to be optimized during the design phase. For example, reliability and maintainability are essential in aerospace manufacturing (Dhillon, 1999). Furthermore, although new models can be developed from an original design, certified and tested aerospace products keep most of their initial design structure for tens of years (P&WC, 2020). Therefore, human error prevention must expand beyond the design phase in complex manufacturing environments to be sustainable.

The analysis of error-related quality deficiencies in complex manufacturing environments may benefit from including various factors at different levels within the organizational structure and other externals to the organization. In this article, systemic methods AcciMap (Rasmussen, 1997) and STAMP (Leveson, 2004) are applied to a complex manual assembly case study from a Canadian aerospace manufacturing company. The analysis is intended to provide the company with elements to build a quality improvement strategy that considers human factors and ergonomics in the assembly process. This includes considerations about technological transformations as these complex assembly tasks are good candidates for introducing digitalization. Complex manual assembly is considered here as an assembly task that requires specialized knowledge and skills for the worker to be able to complete the task. Also, the assembled object is composed of a high number of parts with a high number of possible choices

among them, while the geometry of the assembled object has various symmetric planes (Richardson et al., 2004). Consequently, the cognitive demands on the assembly worker (information perception and processing) are relatively high compared to assembly tasks that are simpler and more repetitive in nature. To explain the underlying psychological and cognitive mechanisms associated with human errors, Rasmussen (1983) proposed the Skills, Rules, and Knowledge (SRK) model. This taxonomy-based model links different types of errors with the three levels of human performance that give the model its name. It is a person-oriented model that describes human behavior from a psychological perspective. As our paper seeks to identify organizational factors influencing human performance and leading to errors, we did not dig into the person-centered and psychological view of human error. Readers are invited to consult the relatively large body of literature related to the SRK model and Rasmussen's work (Rasmussen, 1982; Rasmussen, 1990) as well as other classic authors (Reason, 1990a; Senders et Moray, 1991).

Despite differences between accidents in safety-critical domains and error-related quality deficiencies in manufacturing, we argue that both share similar systemic origins, i.e., there is no single cause, but rather a range of contributory factors within the system. In this way, the analysis of assembly errors is shifted from causality to functional relations (Rasmussen et Svedung, 2000) and provides a more holistic view of the manufacturing system. The working hypothesis is that the system thinking approach and methods, commonly applied in accident analysis research, can contribute to the analysis of quality deficiencies and assembly errors in complex manufacturing environments like the aerospace industry.

5.2 Literature Review

As the complexity of manufacturing and manual assembly systems increases, it seems reasonable to incorporate a system view of assembly errors. With the introduction of Industry 4.0, "mass customization" will become more present (highly individualized products, multiple variants and small batch sizes), increasing the complexity of the production process and, in all

likelihood, of manual assembly work (Thoben et al., 2017). Furthermore, introducing new technologies to support the worker's performance (e.g., augmented reality, collaborative robots, exoskeletons) also represents a significant challenge for the sector in terms of usability, integration, and interactions (Nadeau et Landau, 2018; Zhu et al., 2021). In a recent literature review about manual assembly and Industry 4.0, the authors concluded that the increased complexity associated with the technological transformation in the manufacturing sector should be properly addressed at multiple levels within the organization (Miqueo et al., 2020). The authors of the review advocate for a more holistic approach when addressing manual assembly in an Industry 4.0 context. Furthermore, the concept of Industry 5.0 is rapidly becoming an extension to Industry 4.0, providing a vision of industry that looks beyond efficiency and productivity and reinforces the role and contribution of industry to society (Breque et al., 2021). So far, the main concern in Industry 4.0 has been automation, whereas Industry 5.0 will focus on the synergy between humans and autonomous machines (Nahavandi, 2019).

In view of the above, an approach like human reliability analysis (HRA) would not be sufficient to understand the complex interactions and factors associated with assembly errors in an increasingly complex manufacturing environment. The HRA approach seeks to quantify the probability of error by using task-dependent probabilities of failure modified by the so-called performance shaping factors (PSFs). These PSFs represent environmental, personal, or task-oriented factors that influence the likelihood of human error and include factors such as task load, task speed, complexity, procedures, stress, experience, training, environmental conditions (e.g., lighting, noise, temperature), work hours, breaks and shift rotations, among others (Swain et Guttmann, 1983). The HRA approach does not explicitly incorporate a systemic view of errors, as this approach is centered more on task- and goal-related human behavior (Sträter, 2019). The so-called PSFs may be considered latent conditions (Reason 1990) that are found at the micro and meso levels within the organizational system with little consideration for the macro-level (Rodríguez et Hignett, 2021).

The system thinking approach has been mostly applied in the field of safety over the last decades (Waterson et al., 2015). Its use in manufacturing environments and particularly in complex assembly systems could help to highlight the impact of organizational influences on the assembly workers' behavior. This proposition is in line with current trends in the scientific literature. Indeed, a recent literature review exploring the state of science as to key perspectives on human errors concluded that "although a useful contribution has been made, we must move beyond a focus on an individual error to systems failure to understand and optimize whole systems" (Read et al., 2021). If sustainable manufacturing systems are to be achieved to limit the environmental and social impacts of their operations (Sartal et al., 2014), HF/E systems-based tools offer an opportunity to understand and address these complex problems (Thatcher et al., 2020).

The systems thinking approach has its roots in the work of the Austrian biologist Ludwig von Bertalanffy, considered the father of the General System Theory-GST (Montuori, 2011). Initially associated with living systems and biology, many other scientific disciplines have adopted the fundamentals of the GST (Haines, 2010). In systems thinking the focus is placed on structures, relationships, and interdependence between elements to better understand complex and dynamic scenarios (Amagoh, 2016). It is defined as "a set of synergistic analytic skills used to improve the capability of identifying and understanding systems, predicting their behaviors, and devising modifications to them in order to produce desired effects" (Arnold et Wade, 2015). Systems thinking is nowadays closely linked to complexity theory which has resulted in the emergence of Systems Thinking and Complexity Science (Gates, 2016). In the case of manufacturing, since the early 70's, Cooper and Foster (1971) have already referred to production systems as sociotechnical systems (STS) that involve the technology (machinery, plant layout, raw materials) and the social organizational structure. A vast body of literature on system theory, systems thinking, and complexity theory have been produced in the last decades. Readers are invited to consult recent literature reviews conducted about these topics (Gates, 2016; Hossain et al., 2020).

From an accident analysis perspective, it is well acknowledged that all human behaviors are affected by the context in which the operator error occurs, that is, corrective interventions should focus not only on the operator's behavior and immediate surroundings but also on the system (Hollnagel, 2006; Leveson, 2011). Since the late 1980s and early 1990s, it was clear that the analysis of human behavior was not enough to understand accidents and that there were significant challenges in attributing causalities (Dekker, 2017). For example, according to Reason (1990a), although error and violations are directly related to 'front-line' operators, these are rarely the principal instigators of complex socio-technical system breakdowns. Similarly, Rasmussen (1990) stated that "the identification of errors as a separate class of behavior is becoming increasingly difficult in modern work environments." Likewise, a more recent perspective sees accidents as a system phenomenon arising from the interconnectivity between multiple contributory factors at different levels within the system (Carayon et al., 2015a; Fan et al., 2015; Hulme et al., 2019).

The adoption of the "systemic view" has led to the emergence of several systemic accident analysis methods, including the Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) (Shappell et Wiegmann, 2000c), AcciMap (Rasmussen et Svedung, 2000), Systems-Theoretic Accident Modeling and Processes (STAMP) (Leveson, 2004), Functional Resonance Analysis Method (FRAM) (Hollnagel, 2012) and more recently, Event Analysis of Systemic Teamwork Broken Links (EAST-BL) (Stanton et Harvey, 2017), and Networked Hazard Analysis and Risk Management System (NET-HARMS) (Dallat et al., 2018). In a literature review of several of these methods (AcciMap, STAMP, HFACS and STAMP) conducted between 1990 and 2018, the authors found that the most common contexts of use were aviation, maritime, rail, public health, and mining (Hulme et al., 2019). Nonetheless, systems thinking-based risk assessment methods are being increasingly used beyond safety science. The applications include the study of identity crime in darknet marketplaces (Lane et al., 2020b), the analysis of hazards of drinking water source protection (Merrett et al., 2019), the identification of barriers to treatment for people with eating disorders (Lane et al., 2020a) and the analysis of complex global problems from a sustainability point of view (Thatcher et al., 2020). Another

review about two well-known systemic methods (FRAM and STAMP) shows that despite the limited number of applications in manufacturing, these systemic methods are suitable for understanding, explaining, and analyzing complex manufacturing systems (Mofidi et Nadeau, 2021). For example, FRAM was recently used to provide insights into OHS and the operational risks posed by the introduction of a data glove to an assembly system (Naeini et Nadeau, 2022).

The idea of applying safety tools to quality management (and vice-versa) is not new. Since the same principles of management are used to a variety of risks (e.g., financial, operational, occupational, environmental), methods and tools developed for the analysis of one of these risks are also frequently used for the others (Mouras et Badri, 2020). For example, several quality management tools are used to ensure effective occupational risk management, which includes such a technique as histograms, Pareto diagrams, Ishikawa diagrams and Data Matrix Analysis, among others (Górny, 2017). Similarly, Failure mode and effects analysis (FMEA), a well-established reliability engineering technique, is also used for continuous quality improvement (Doshi et Desai, 2017) and occupational risks analysis (Mutlu et Altuntas, 2019). This cross-disciplinary use of techniques and methods is possible because of shared communalities among productivity, quality, safety and reliability (Hollnagel, 2020).

In the context of this article, clarification must be made as to the difference between accidents in safety-critical fields and error-related quality deficiencies in the manufacturing sector. For example, accident investigation reports usually provide a relatively straightforward temporal sequence of events associated with the accident object of investigation. However, in the case of error-related quality deficiencies, the investigation report and follow-up rarely provide a precise sequence of events. This may be in part because accidents are acute events causing a significant disturbance in the system (ex. injuries, deaths, and property loss). Thus, stakeholders may be very keen to understand in detail what happened. At the same time, quality deficiencies can be considered chronic events that repeat with a certain systematicity within the system. For this reason, the analysis and search for causes of quality deficiencies have tended to rely more on the statistical analysis of data, an approach belonging to the field of

quality control (Bajpai, 2018; Das, 2013), while the study of major accidents in safety-critical domains tends to rely more on a case-specific approach (Dadashzadeh et al., 2013; Fu et al., 2018). Deeper, more case-oriented investigations are conducted when quality deficiencies lead to product safety events and recalls as in the manufacturing of medical devices, consumer products, and automobiles or aircraft, among others (Maruchek et al., 2011).

We argue that when analyzing quality deficiencies associated with human behavior (i.e., errors in manual assembly), the analysis could benefit from expanding beyond a data-driven approach. Table 5.1 shows a non-exhaustive group of differences between the investigation of accidents and error-related quality issues in safety-critical domains and manufacturing, respectively.

Tableau 5.1 Difference between accidents in safety-critical domains and error-related quality deficiencies in manufacturing

	Safety-critical domains	Manufacturing manual assembly
Main event of interest	Major accidents.	Quality deficiencies.
Impact of the event	The impact is generally associated with catastrophic events or events that can lead to death, injuries or major property losses (Moura et al., 2016).	The impact is mostly economical and associated with cost of non-quality (Falck et Rosenqvist, 2014). However, it can have serious consequences in some cases, e.g., the production of medical devices, automobiles, and aircrafts (Maruchek et al., 2011).
Frequency of events	Rare events that occur sporadically (Reason, 1997).	Relatively frequent events that tend to occur as part of production (Falck et al., 2014).
Chain of events	A chain of events is usually sought (Singh et al., 2019).	A chain of events is not necessarily sought (Escalante, 1999).
Approach	In-depth analysis of the sequence of events and factors associated (Dadashzadeh et al., 2013; Fu et al., 2018).	Use of statistical analysis coming from company data records (Bajpai, 2018; Das, 2013).
Regulatory framework	Tends to be a high number of regulations at different levels, e.g., international, national, local (Johnson, 2014).	A relatively less regulated environment that uses manufacturing best practices and internal regulations (Kohl et al., 2015). Some exceptions (e.g., aircraft manufacturing)(Landoni et ogilvie, 2019).

5.2.1 Description of AcciMap

AcciMap was developed to graphically map multiple contributing factors and their relationships on different levels of a socio-technical system (Rasmussen, 1997). It enables the introduction of a much higher number of potential dimensions than other methods that are restricted to the immediate workers' environment (e.g., human reliability analysis). Rather than focus on the physical process, AcciMap focuses on the functional relationships that exist at different levels within an organizational hierarchy (Rasmussen et Svedung, 2000). The method is based on functional abstraction rather than structural decomposition. Thus, the criterion for its construction is not a truthful representation of facts but a representative identification of factors sensitive to improving the system (Svedung et Rasmussen, 2002). In AcciMap, the inter-related contributing factors are mapped into six hierarchical levels: (1) government policy and budgeting, (2) regulatory bodies and associations, (3) local area government/company management, including planning and budgeting, (4) technical and operational management, (5) physical process and actor activities and (6) equipment and surroundings. However, in practice, the number of levels and the names of the levels might vary depending on the requirements of the accident scenario (Thatcher et al., 2020). Figure 5.1 shows the original proposed standardized symbols for AcciMap and the six system levels.

The AcciMap model can be used as a standalone tool or as a part of a broader risk management framework containing other graphic representation tools, such as ActorMap and InfoFlowMap (Svedung et Rasmussen, 2002). A literature review about AcciMap conducted by Waterson et al. (2017) shows a multitude of applications of the approach for analyzing large-scale and complex accidents. This includes sectors such as nuclear, aviation and aerospace, transportation, public health emergency response, and gas.

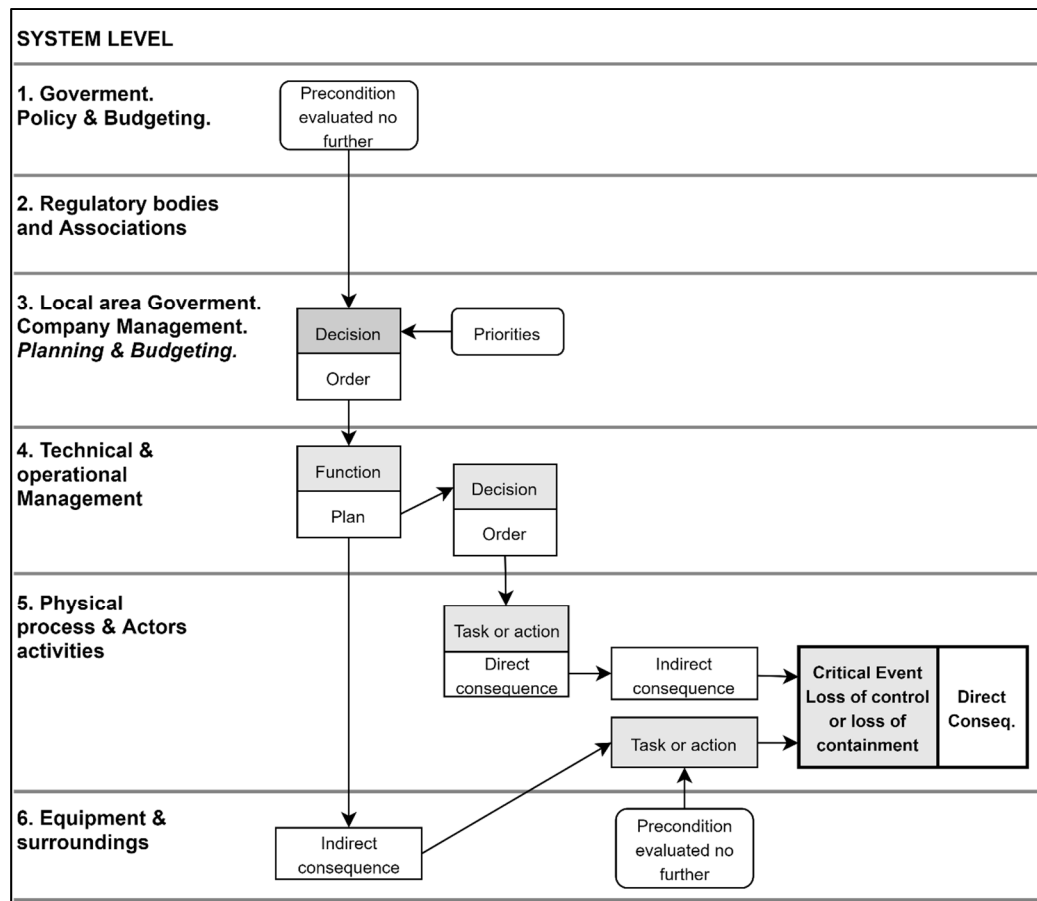


Figure 5.1 Proposed legend to standardize AcciMap symbols
Tiré de Rasmussen & Svedung (2000, p. 21)

Branford et al. (2009) developed a guideline for using AcciMap. They proposed a "standardized" AcciMap, which they adapted from the original format proposed by Rasmussen and Svedung (2000). Instead of the six hierarchical levels proposed initially, Branford et al. (2009) only used four: (1) external, (2) organizational, (3) physical/actors events, process and conditions and (4) outcomes (Figure 3). Also, Branford et al. (2009) introduced significant changes in the structure of the visual representation that may lead to misinterpreting an AcciMap as a sequence of events. This contradicts the original idea of Rasmussen and Svedung (2000) to represent functional relations through the various levels within the organizational hierarchy.

In this study, we chose to adhere, as much as possible, to the original format, symbols and guidelines provided by the authors of AcciMap. However, to adapt to the manufacturing context, it was preferable to merge the first and second level from Figure 1 into a generic level "external". Accommodating a level to adapt to a specific context is frequently done in the literature when using AcciMap (Waterson et al., 2017).

5.2.2 Description of STAMP

Systems-Theoretic Accident Model and Processes (STAMP) is a relatively new model for accident causation and was developed by Leveson (2004), based on Rasmussen's (1997) risk management framework. Leveson (2004) presents accidents as a control problem changing the emphasis from preventing failures to enforcing constraints on system behavior. One main way in which it differs from AcciMap is that rather than only linking the contributing factors through structural relationships, STAMP considers the constraints that actors/agents place on the system. In STAMP, each superior level within the hierarchy acts as a controller of the inferior level by enforcing specific constraints, which enforce the system-level constraints. As a result, system failures are produced because there was a lack of appropriate enforcement of safety constraints. Thus, STAMP integrates system theory and control theory approaches. For this reason, Salmon et al. (2012) define STAMP as a "constraint-based model which focuses on the interactions between system components and the control mechanisms used throughout the work system".

The emphasis of STAMP is on the prevention of failures at the system level through the enforcement of safety/security constraints on system behavior. Figure 5.2 shows a generic control structure model provided by Leveson (2004) to guide the analyst. This is a common socio-technical hierarchical safety structure typical of regulated and safety-critical industries in the United States, such as aerospace (Leveson, 2011). Two hierarchical control structures are proposed, one for system development (left) and one for system operations (right). Each system should be modeled to include its specificities.

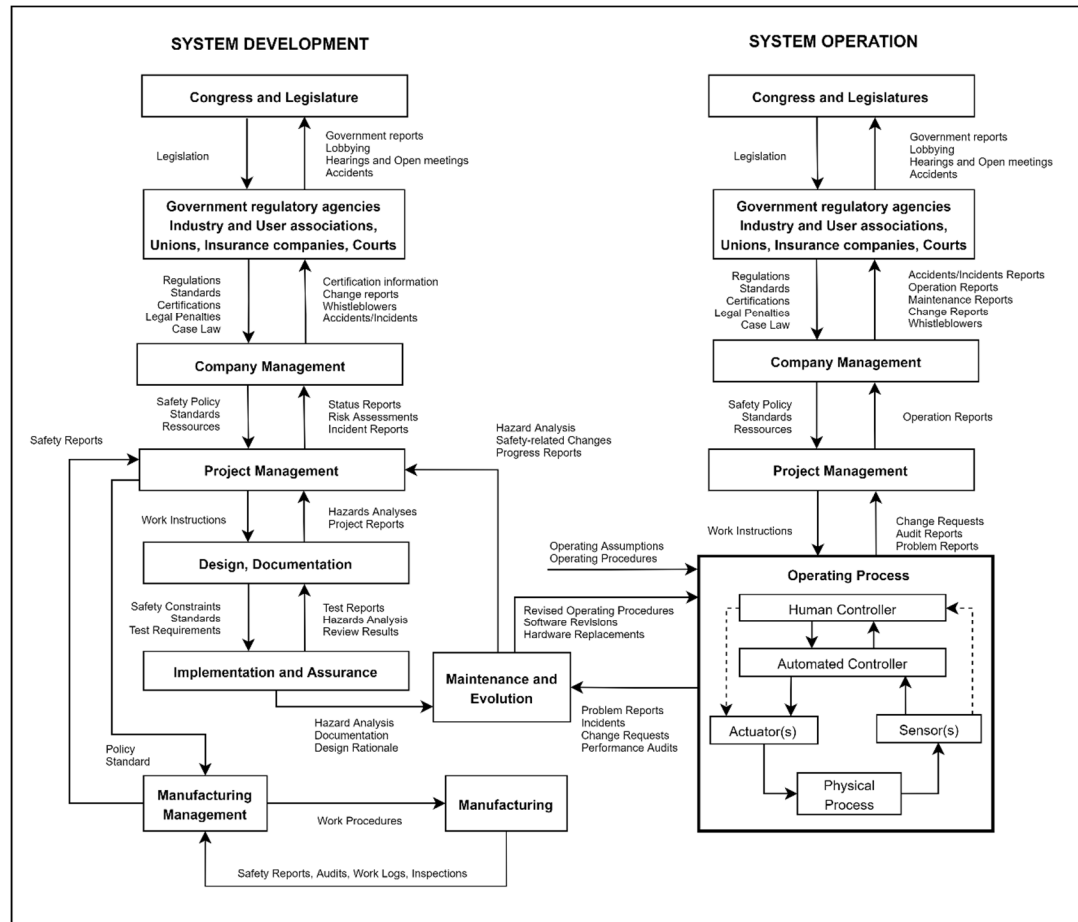


Figure 5.2 General form of a model of socio-technical system control structure
Tiré de Leveson (2004, p. 257)

One of the core concepts within STAMP is control loops. A control loop goes in two directions: top-down by enforcing safety constraints (control actions) then bottom-up by providing feedback (information). In this view, the upper level is the control process while the lower level represents the controlled process. Systems are regarded as interrelated components that are kept in dynamic equilibrium by feedback control loops. When used for accident analysis purposes, STAMP describes the system control's structure and then identifies failures in this control structure that contribute to the accident. Figure 5.3 shows the taxonomy of failures associated with a control loop.

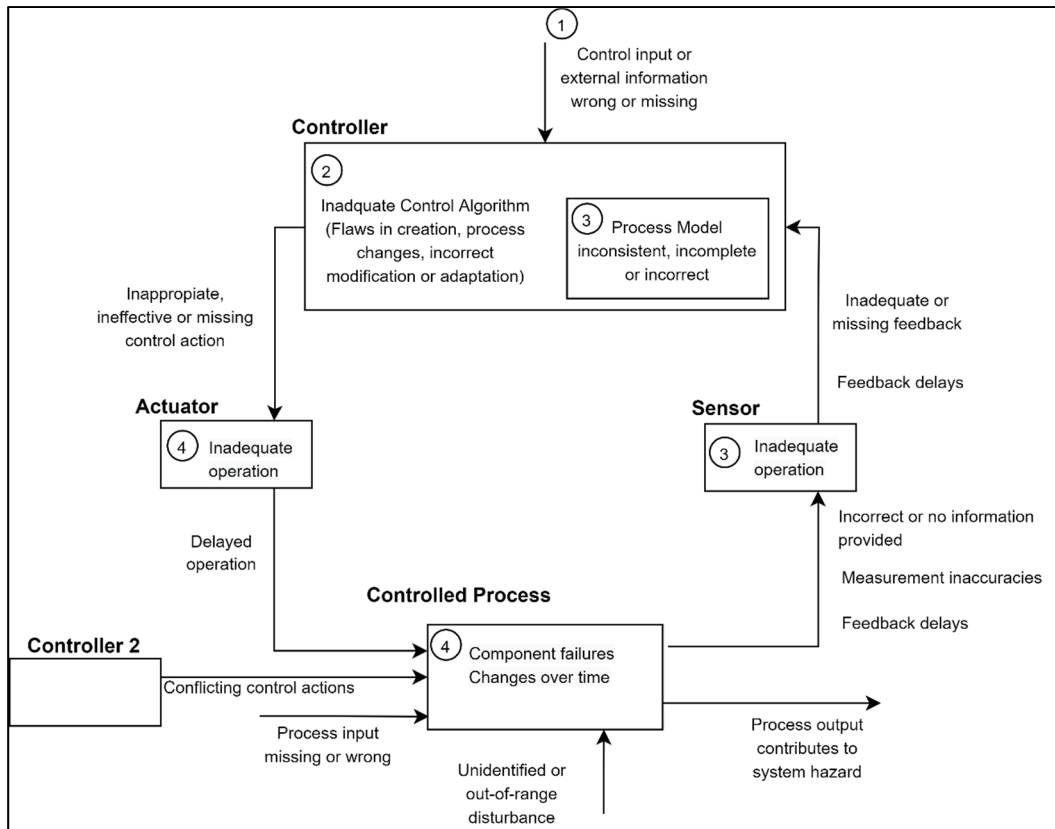


Figure 5.3 Classification of control flaws leading to hazards
Tiré de Leveson (2011, p. 93)

5.3 Method

5.3.1 General approach

A case study was selected as the appropriate approach for identifying, understanding and analyzing the manufacturing socio-technical system where a complex manual assembly is embedded. AcciMap and STAMP are methods intended to describe accidents or events from a systemic point of view. As a result, they focus on analyzing specific scenarios in detail. Thus, case study research is an appropriate methodology for systemic methods. Case study research can be defined "as an intensive study about a person, a group of people or a unit, which is aimed to generalize over several units" (Heale et Twycross, 2018). In case studies, researchers conduct a systematic investigation and examine in-depth data relating to several variables

associated with the object of study. This leads to an in-depth understanding of particular phenomena in real-world settings (Blichfeldt et Andersen, 2006). A case study is especially appropriate when researchers require an investigation that goes beyond the study of isolated variables, which is also the requirement for the application of systemic methods. The examination of the manual assembly context from a socio-technical system perspective is an integral aspect of understanding its internal dynamics. This examination favors the collection of data in real settings (Yin, 2012).

The data and information used to conduct the analysis with systemic methods and populate AcciMap and STAMP came from a project carried out at an aeronautical manufacturing facility in Canada over a period of approximately 12 months. During that period, the research team had recurrent access to primary data sources and direct communication with stakeholders. Several stakeholders participated in the research: two senior company quality managers, the quality manager and the production manager of the manufacturing facility, three quality specialists, two assembly line supervisors, and a varied number of assembly workers throughout the study (Torres et al., 2021b; 2021d). Union representatives were consulted for permissions. Involvement of stakeholders took various forms: providing information and documentation upon request, follow-up meetings with company quality managers, presentation of preliminary results with group discussions (including validation of data and information collected). Various methods of data collection and analysis were employed: statistical analysis of quality data, field observations (systematic and walkthrough), non-structured interviews with workers and other stakeholders, group discussions, search in the company records (quality data, assembly instructions, working times), questionnaires for the evaluation of perceived fatigue and workload, human reliability analysis for the identification and quantification of error modes and the use of a mathematical model to evaluate shiftwork practices. Results of the project can be found in scientific journal papers conference chapters (Torres et Nadeau, 2020b; Torres et al., 2021b; 2021c; 2021d). All research interventions involving human subjects were approved by the institutional ethics committee.

A non-disclosure agreement protects specific information on the company, process and product. However, readers are invited to consult a previous paper describing and illustrating the assembly tasks object of study (Torres et al., 2021b). It shows visual representations of an assembly workstation, assembly parts and tools used by workers, and sections of the structure of the assembled product.

To situate readers, a case synopsis was elaborated based on the results of the field project. The case synopsis describes in more detail what was done, and the information obtained and used to populate the AcciMap and STAMP diagrams. The case synopsis is equivalent to the incident description, or the case incident synopsis presented in other studies as part of the analysis with systemic methods (Branford, 2011; Goncalves Filho et al., 2019; Igene et Johnson, 2020; Salmon et al., 2012). Figure 5.4 shows the general steps of the methodological approach followed in this study. This is a broad representation, and the construction of the case synopsis draws from several other studies, previously mentioned, as part of the action research project conducted at the industrial partner facilities. Each study had its own detailed methodology. The description here corresponds to the general methodology associated with this article and the application of systemic methods to the case study.

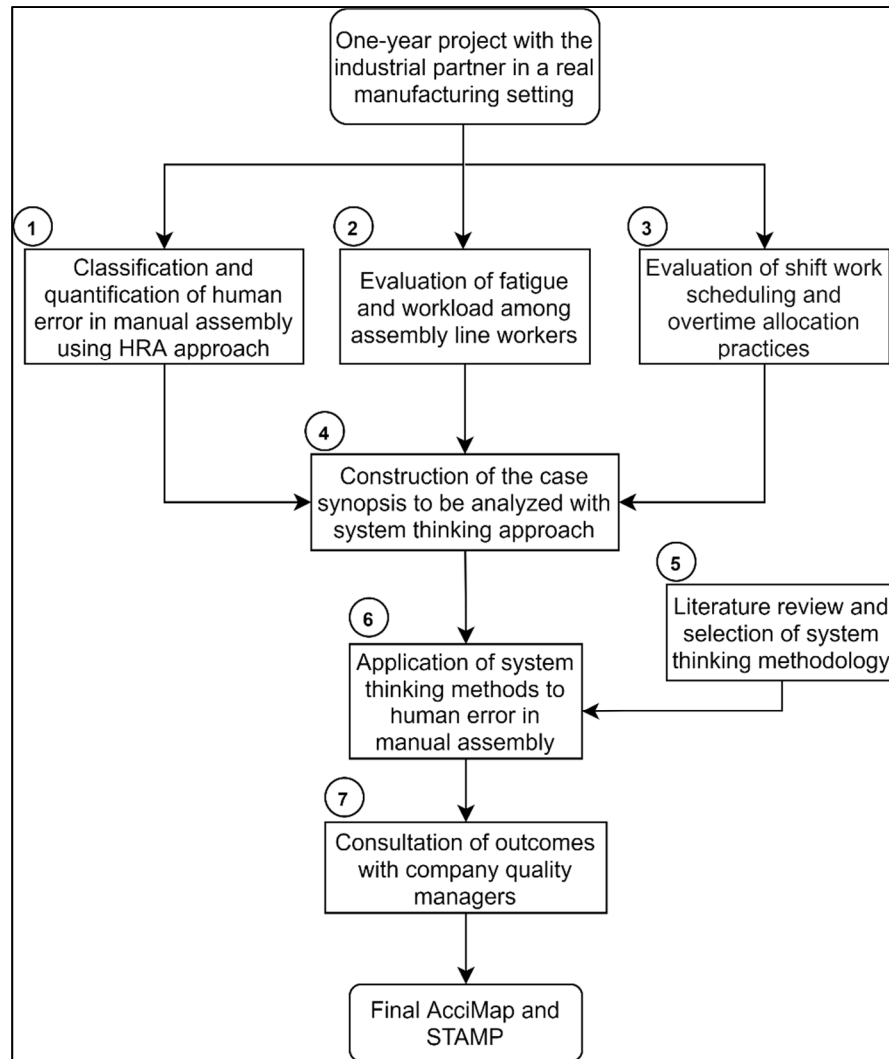


Figure 5.4 Logic approach used to construct the case synopsis and apply systemic methods

We selected “failure to properly install bracket” as the main event for the analysis with systemic methods. We consider this event to represent the primary quality deficiencies in the final assembly lines. In a previous study, this assembly part was associated with the most significant number of error modes and the highest error probability (Torres et al., 2021b). The event “failure to properly install bracket” is not associated with a specific bracket. Instead, it should be understood as a generic event representing all the occasions when something was unintentionally wrong while installing a bracket. Additionally, several error modes related to

this event are also associated with other assembly parts, considering, for example, that brackets are fixed to the assembly structure using bolts, nuts, and require the application of torque and appropriate spatial orientation.

5.3.2 Case synopsis

The company under study was experiencing some quality deficiencies in their assembly lines that were recognized to be associated with human errors. The initial phase of the project focused on analyzing data from the company quality records to identify critical parts related to quality issues. Data analysis identified the assembly line and operations that were the most significant sources of error-related quality issues. The statistical analysis showed that 67% of all wrongly installed parts were associated with brackets (27%), cushioned loop clamps (25%) and bolts (15%). Similarly, 65% of the missing parts were associated with cap covers (40%), brackets (13%) and cushioned loop clamps (12%). All these parts are predominantly integrated into the assembly structure toward the end of the main assembly line. The typical final production line is composed of a sub-assembly area and the main assembly line. Sub-assemblies and workstations at the beginning of the main assembly line are characterized by tasks associated with the coupling and tight adjustment of relatively large, low-in-number parts. Towards the end of the main assembly line, the number of components to be assembled increases, and the components tend to be smaller (ex., brackets, bolts, washers, caps, cable and tube connections). To do this, the assembler needs more spatial and geometric references, and consequently, relies more on interpreting assembly instructions.

The assembly instructions are delivered by the manufacturing execution system (MES) and displayed on a computer terminal at the workbench (PC stationary screen), located approximately 2 meters from the assembly position. Instructions consist of text and 2D drawings providing basic visual descriptions of the assembly steps. Although different colors and views are shown, the level of rendering is relatively low. Furthermore, drawings are static in nature (images cannot be rotated). The MES interface includes a 17-inch screen (output

device), a keyboard and a mouse (input device). Analysis of the work instructions revealed some issues: the sequence of steps in the drawing does not follow the typical order (e.g., clockwise), the location of the lateral views is far from the actual place on the instruction drawings and the 2D-drawings themselves are low resolution. Also, the assembler must move back and forth from the assembly position to the computer terminal in the workstation while executing the assembly tasks as the computer terminal is not portable.

A previous human reliability analysis (HRA) study found that the highest human error probabilities were associated with assembly parts sensitive to geometry-related errors, i.e., brackets and cushioned loop clamps (Torres et al., 2021b). Both serve as devices for the attachment of cables, pipes, or other external components. The mentioned HRA study also found several error-producing conditions, such as a mismatch between spatial and functional information provided to operators, poor system feedback, little or no independent checking/testing of immediate output, and distractions and task interruptions. The HRA, by nature, focused on the assembly workers' immediate work environment.

From the logistics system perspective, the challenges relate to the parts supply instability. As a result, production levels vary according to the availability of parts. For example, sometimes, the production level is higher during the last week of the month than during the first weeks of the month. This generates pressure on the production system to deliver the final product on time and meet deadlines contracted with clients. For this reason, during weeks of high production, some assemblers must do overtime. The overtime allocation management practices vary according to the needs. Supervisors allocate overtime, adding four-hour blocks to shifts or adding extra workdays to the workweek. There are two main work shifts that rotate, the morning (6:30 a.m.-2:30 p.m.) and evening shift (2:30 p.m.-12:30 a.m.). A previous study, evaluating shiftwork schedules and overtime allocation practices, shows that some assemblers can accumulate significant overtime, e.g., 72h/week, and that fatigue levels may be affected by increased workloads or extended working hours (Torres et al., 2021d). At the same time, the statistical analysis of data revealed a moderate inverse correlation between the amount of

production and the number of quality issues. This seems to corroborate the idea expressed by some quality specialists that a low production output does not necessarily guarantee better production quality.

An evaluation of fatigue and workload among a group of fourteen assemblers was done over a two-week period. It showed that high fatigue levels were reported in one-third of the shifts evaluated (Torres et al., 2021c). The main predictors of high fatigue were workload estimates, working evening shifts, and baseline fatigue. Among the six dimensions of workload, mental demand was a predictor of increased fatigue and was also rated the highest. Participants also reported less than seven hours of sleep in 60% of the nights evaluated. The study reported that cognitive load is a factor to consider in the studied context as well as work schedule planning (shift duration, start times and end times, etc.), all this because of the negative influence of fatigue and the potential disruptions of sleep among workers.

From a managerial perspective, the company is currently examining technological strategies to be implemented in their manufacturing facilities. The company is also evaluating the potential of various technologies within Industry 4.0. This is because the manufacturing execution system needs significant upgrades to keep up with more recent technological advances. Similarly, the uncertainties of delivery time associated with supply chain are a hot topic at the different hierarchical levels within the organization due to their recognized impact on the production system.

5.3.3 Selection of systemic methods

AcciMap and STAMP were selected as the systemic methods to conduct the analysis for several reasons. Firstly, both methods are based on generic models, that is, they can be applied in a wide variety of fields (Underwood et Waterson, 2012). This makes AcciMap and STAMP among the most employed systemic approaches in safety-critical domains (Hulme et al., 2019). According to Thatcher et al. (2020) AcciMap and STAMP are also part of the dominant

systems-thinking analysis tools in HF/E. Secondly, there is a substantial amount of information available about the application of these two methods, which can support and guide the analysts. The information is relatively easy to access and very frequently it is of public domain. Finally, it has been noted that the combined use of these two methods can be beneficial (Goncalves Filho et al., 2019) as no single systems analysis method is recommended to be used in isolation, to help identify key insights for intervention (Thatcher et al., 2020).

To construct the various diagrams, the software diagrams.net desktop app 14.4.3 (previously draw.io) was used. This software can draw flowcharts, network diagrams and create UML, design database schema, and build BPMN (Diagrams.net, 2021). It is a free open-access software that is very versatile for system modeling purposes. The diagrams were created using the desktop version of the software. It is a fully client-side application. Also, all diagrams were created and stored locally. Other software can be used for the same purpose, such as MS Visio. For example, the System Thinking Lab at Loughborough University developed a guideline to help use MS Visio when building an AcciMap (Ray, 2017). However, because MS Visio is a proprietary software not freely available, it was decided not to use it in this study.

5.3.4 Validity and reliability

The validity and reliability of ergonomic methods are essential elements to consider in any research endeavor. According to Goode et al. (2017) "methods must produce an accurate representation of the situation under analysis (valid) and repeated analyses of the same data should produce the same results when completed by the same person and by different people (reliable)". Still, it has been stated that validity remains ill-defined for certain categories of ergonomics methods, such as systems-based analysis methods (Thoroman et al., 2020). According to Underwood and Waterson (2014), the qualitative nature of STAMP and AcciMap negatively impacts their reliability, and this might be accentuated by their lack of detailed taxonomy of contributory factors. However, subsequent studies have not proved that the use of taxonomy significantly increases the reliability of systemic methods (Goode et al., 2017;

Igene, 2020). In a more recent paper, Hulme et al. (2021) tested the validity of several accident analysis methods. The authors found that systems-based accident analysis methods did not produce satisfactory validity results compared to an expert analysis used as reference. Overall, the validity and reliability of these methods can be considered to be low to moderate at best.

AcciMap and STAMP were used as analytical methods for modeling interactions within the system, contrasting with evaluative methods, which seek precise measurements (Annett, 2002). The latter is more associated with a positivist research paradigm (Park et al., 2020). We followed a realistic mode of inquiry common to case study research (Koenig, 2009). That means that systemic methods were used to discover new relationships (previously unseen) within a given reality and to develop an understanding of the socio-technical system object of study rather than verify a predetermined hypothesis. Riege (2003) proposed various criteria for judging the quality of a case study to achieve objectivity and rigorous and relevant information. Following Riege's criteria (2003), we used multiple sources of evidence for construct validity (search for confirmability). Key informants reviewed the reports associated with the case study, and stakeholders and research supervisors judged whether inferences were logical based on the data analysis. For internal validity (search for credibility), we used several methods for collecting and analyzing data (triangulation), e.g., observations, interviews, and statistics from quality records. Debriefings on a regular basis were used to present the results of the data analysis and conclusions to the company's stakeholders and research supervisors. In the case of external validity (search for transferability), our analysis is based on only one case study, which means that replication logic through multiple case studies could not be applied. Additionally, the existing literature on systemic methods used to error-related quality deficiencies in manufacturing is scarce, limiting our capacity to compare results. From a reliability point of view (search for dependability), the full detailed account of the case study protocol and database is subjected to confidentiality (non-disclosure agreement).

5.4 Results

5.4.1 AcciMap result

The AcciMap diagram is presented in Figure 5.5. The outcome was defined as "failure to properly install a bracket" and is represented on a gray square on the Physical process and Actor activities level of the AcciMap diagram. As mentioned in the case synopsis, this is a common error-related quality issue during the assembly process. The contributing factors to this outcome are discussed in more detail below. They are grouped by the level of the manufacturing system's hierarchical structure, represented in the AcciMap diagram.

Physical process and actors' activities: this level describes contributory factors closely related and associated with the behavior and performance of assembly workers. The nearest contributory factors identified were fatigue, distraction and interruptions, improper mental representation of assembly instructions and the cognitive or mental workload. Other influencing factors identified at this level were the variation in production demand (high and low), accumulation of working time, discontinuity in the task, geometry of assembly components and number and variety of assembly components.

Equipment and surroundings: the contributory factors at this level include the lack of space, the workplace layout and the difficulties in accessing assembly instructions. Indeed, workers need to go back and forth between the assembly station and the computer terminal to read instructions because, from a distance, it is difficult to decipher the computer screen. Additionally, the tools used during the assembly process do not provide tracking or immediate feedback during the task execution. Thus, missing or wrongly installed parts cannot be immediately detected. Another contributing factor is that the deviation detection process is a visual inspection performed by the worker.

Technical and operational management: this level refers to contributory factors associated with middle management (e.g., production, quality, and IT management). The factors identified were the variation in production levels resulting from production planning, the overtime allocation and shift scheduling policy resulting from staff level planning and the lack of integration of end-user requirements (the assembly worker) within the manufacturing execution system. Another identified factor was the inadequate design of working instructions (relatively low-quality 2D instructions, not very intuitive) as well as the design complexity of the assembly object. The latter is the result of the technical requirements used in the design phase.

Company management, planning and budgeting: this level represents the highest hierarchical level within the organization. Some contributory factors were identified, such as production deadlines being set based on the management of client contracts. The production deadlines represent a constraint to the production process, which must adjust to meet the deadlines. Wage policy incentive, collective agreement, company IT strategy, and budget allocation strategy were also identified as contributory factors. The wage policy incentive establishes an extra rate for overtime. In the collective agreement, there is no clearly identified limit to the amount of overtime. This financial incentive may encourage some workers to do more overtime to increase their income. Similarly, the collective agreement establishes a priority rule for overtime allocation among workers. In both cases, there is an influence on staff planning during high production demand. Regarding the budget priority allocation and IT strategy, these influence the design, operation, and update of the manufacturing execution system, which is responsible, among other things, for delivering the instructions to the assembly workers.

External: this level represents factors external to the organization, but which influence the internal processes within the organization. The contributory factors identified in this level were variability in the supply chain, client requirements in terms of schedules, industry regulations, and the client's technical requirements. Sleep deficiency among workers was also identified. The clients' contracted schedules influence deadlines for production and, in conjunction with

the instability in supply chains, result in an adjustment to meet the changing production levels. Industry regulation and client requirements both influence the technical requirements and the design process of the assembly structure. In the case of sleep deficiency (sleep debt), this contributory factor has an influence on fatigue in the Physical process and Actors activities level.

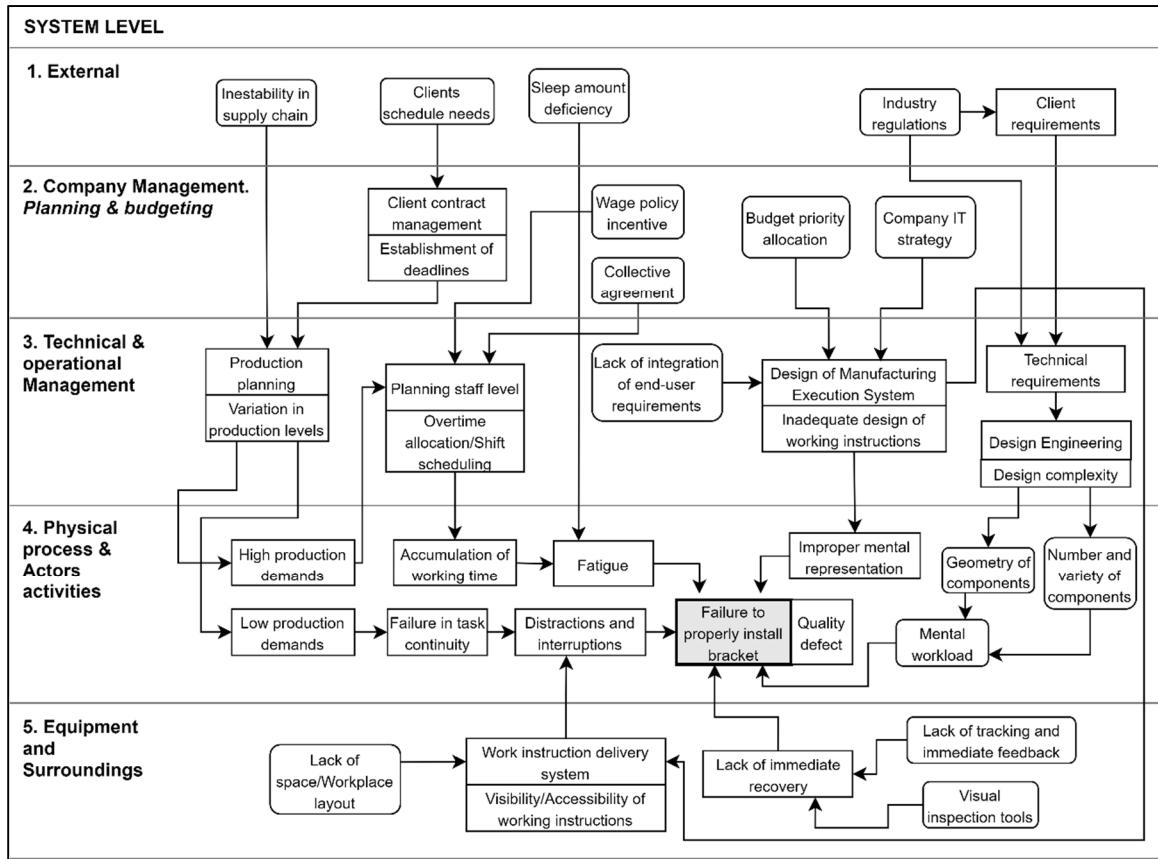


Figure 5.5 AcciMap analysis of the quality deficiency incident: “failure to properly install bracket”

5.4.2 STAMP result

The STAMP analysis involved two phases. Firstly, a diagram of the basic control structure of the system object of study was represented. This is shown in Figure 5.6. Secondly, the taxonomy of failure provided by STAMP was applied to identify failures in the control

structure. The main function to be controlled is the manual assembly process and it was represented at the bottom of the hierarchical control structure.

Production and quality management: control function that is responsible for providing necessary supervision to the assembly process, including quality control and inspection as well as production planning. The received feedback includes production progress reports, quality issues reports, and the data associated with incident investigation.

Engineering design and development: function that exercises control over production and quality management by enforcing standards and design constraints. It also defines test requirements for manufacturing and receives feedback from the assembly process in the form of test results, follow-up reports, changes in production and assembly requirements.

Manufacturing IT system management: control function that is responsible for the manufacturing execution system. It develops the computerized assembly instructions, the necessary system updates and provides user guidelines and training. It needs feedback on user needs and requirements and the system's user and performance report to operate aptly.

Company management: level that exercises control over the previous functions. It enforces industry requirements and standards over engineering design and development and receives status and progress reports. It provides resources and the quality and safety policy.

Regulatory bodies: the regulatory bodies level provides oversight and guidelines to the company because the manufacturing process studied here is part of the aerospace industry. It also verifies and approves production designs. Therefore, company management needs to provide in return the compliance reports and necessary certification information.

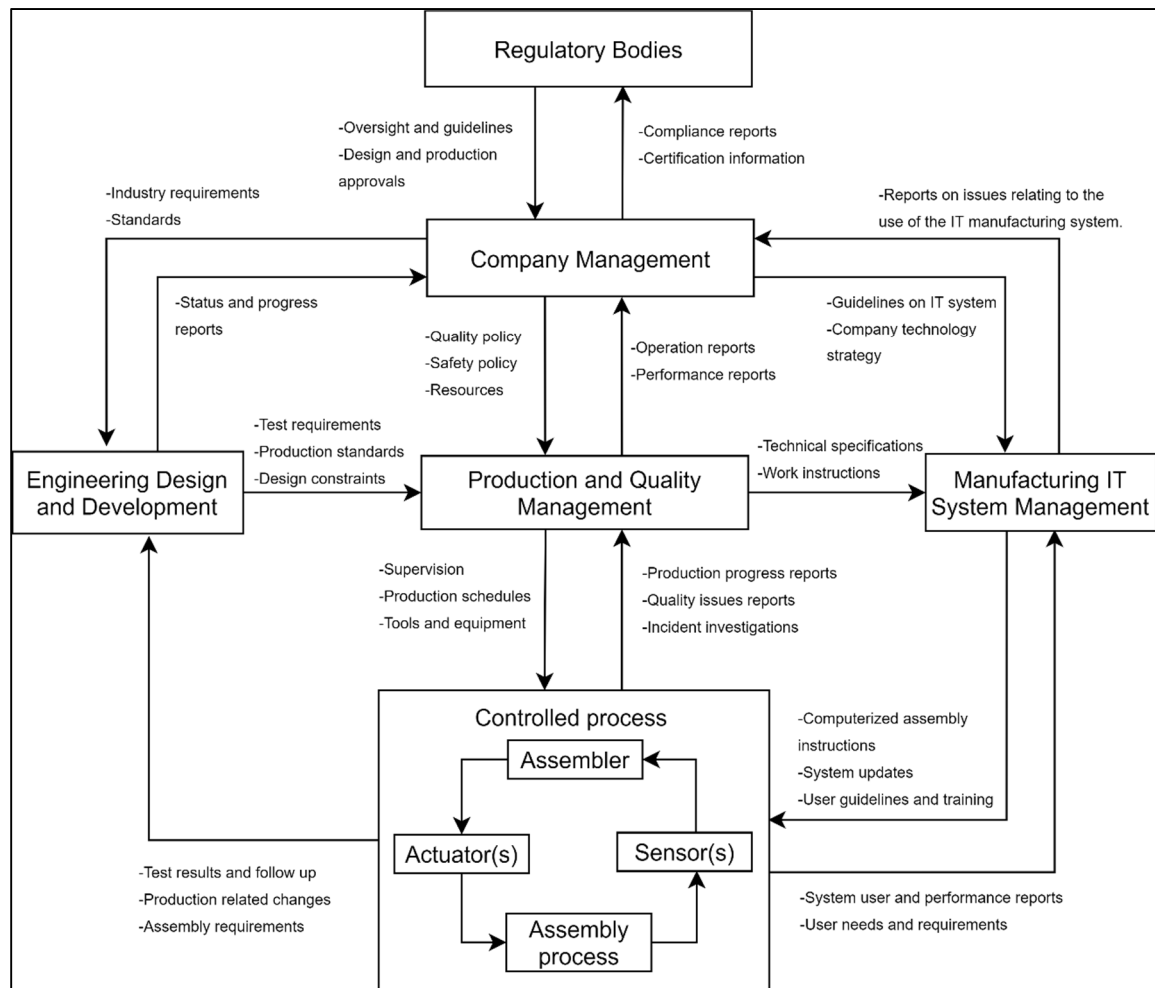


Figure 5.6 Socio-technical system control structure of the assembly process

A more detailed diagram of the control loop of the process object of analysis (manual assembly) is presented in Figure 5.7. As this process is mainly a manual task, the controller in the control loop corresponds to the assembly worker. The process model of the controller corresponds to the mental model of the assembly worker (internal representations of the assembly operations). Indeed, manual assembly is considered a spatial problem-solving activity requiring workers to build a mental model to understand and manipulate spatial information. In this case the mental model constitutes the internal representations of the assembly instructions that the worker uses to execute the assembly tasks. The assembler's hands and tools represent the actuator, while the sensor in the control loop is represented by

the assembler's senses and the tools used for measurement purposes (e.g., torque wrench). The controlled process in the control loop corresponds to the assembly process, which represents the set of operations carried out by the assembly worker.

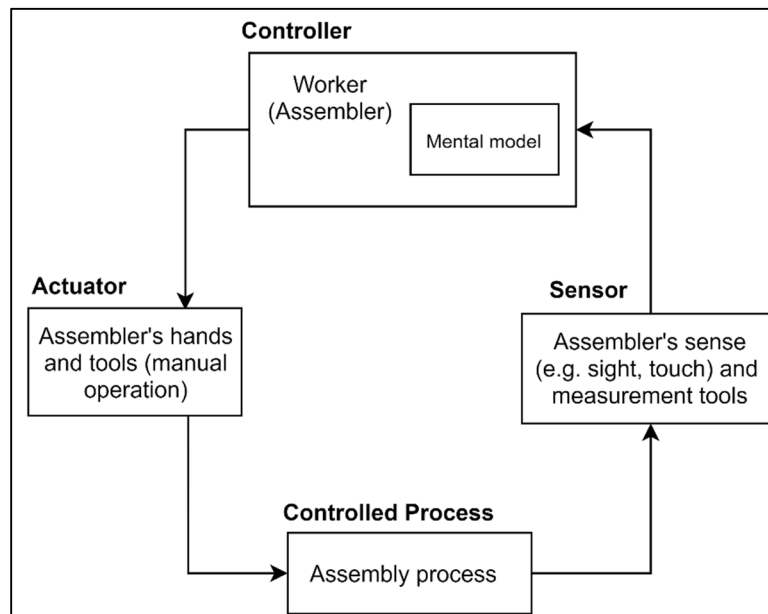


Figure 5.7 Control loop of the assembly process

Using the taxonomy of control flaws proposed by the STAMP method and presented in Figure 5.3, potential failures in the control loop of the assembly process were identified (Figure 5.8). A brief description follows.

The input or the external information provided to the controller (assembly workers) might be wrong or missing. This is particularly true when considering the manufacturing execution system. For example, some deficiencies in the design of the assembly instructions were identified during the field study. These include using non-intuitive 2D static illustrations, low user interface quality, and misleading content (non-typical information presentation). In this way, the information necessary to create easily and comprehensibly a spatial representation of the bracket installation is not optimal, impacting the worker's assembly process mental model.

Additionally, some flaws in the creation process of the executing plan for assembly can arise as the result of a failure during the reading or the interpretation of working instructions by the assembly worker. The previously mentioned flaws in the control structure can lead, for example, to the incorrect installation of parts (ex. bracket in wrong direction/location), selection/installation of a wrong part or missing operations.

No feedback about the bracket installation or false feedback can also contribute to an inconsistent mental model of the assembly operations. The mental model needs to be constantly updated and it might lack a necessary piece of information if a verification was omitted by the assembler or done on the wrong bracket. Inaccuracies of the measurement tool (torque wrench) may be responsible for the inadequate operation of the sensor and inadequate feedback to the controller.

On the other hand, an inadequate operation of the actuator (hand/tools) can be associated for example, to an amount of applied torque to bolts out of technical specifications. Thus, some flaws in the control process are due to variations in the production levels and the workflow discontinuity associated with supply chain instability or other external disturbances such as distractions and interruptions. The process output contributing to system hazards are the quality deficiencies associated with the failure to properly install the assembly parts (bracket in this case). Production planning and overtime allocation were also identified as conflicting control actions that can generate workload in the assembly process. One process input considered to be missing was the lack of tools that can provide adequate tracking/feedback about the assembly operation. Various technological solutions could support the assembly workers.

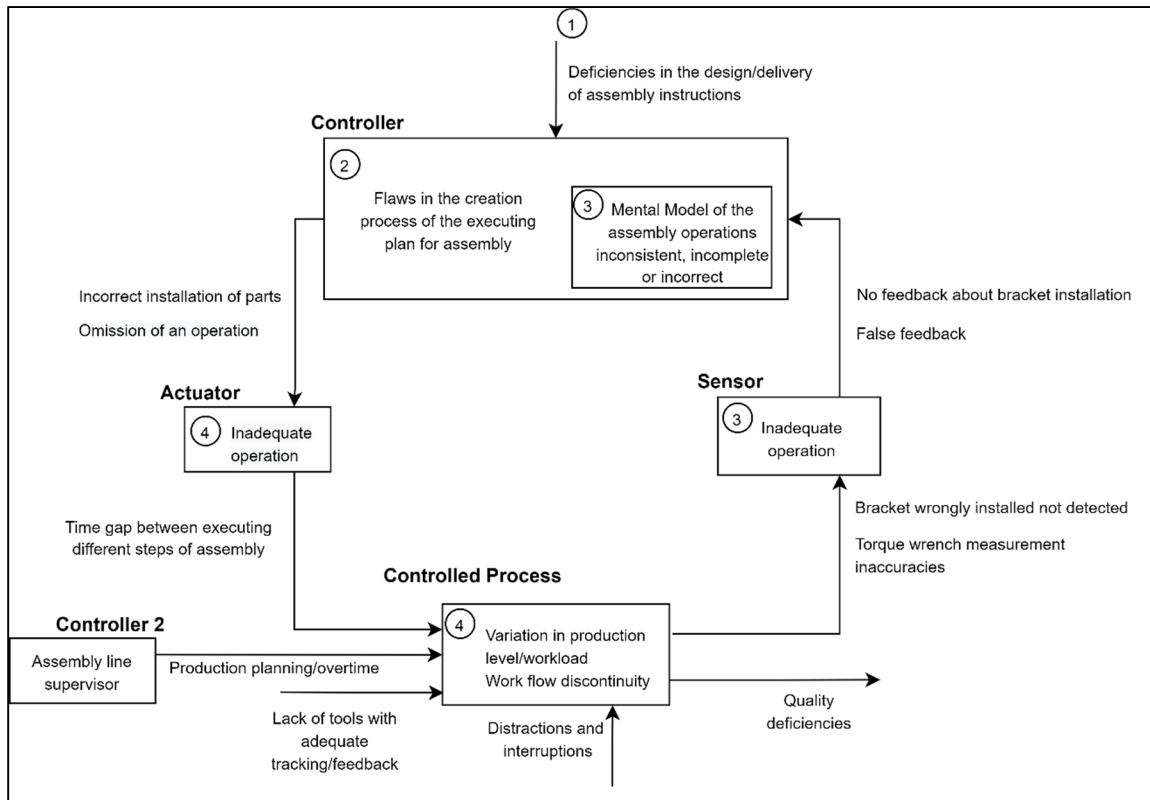


Figure 5.8 Flaws in the control loop of the assembly process based on the STAMP classification

5.5 Discussion

This paper studied error-related quality deficiencies associated with complex manual assembly in a descriptive manner using system thinking methods and approaches. This seems to be a relatively new idea in the manufacturing context where previous application of systemic methods has focused mainly on occupational risks and not on quality (Melanson et Nadeau, 2019; Naeini et Nadeau, 2022). Furthermore, the methods AcciMap and STAMP, used in this paper have been primarily applied in safety-critical domains for accidents analysis (Hulme et al., 2019). An exception to this may be the healthcare sector, where safety and quality are inextricably linked. For example, in a recent paper, McNab et al. (2020) developed and applied a group of system thinking principles for quality improvement in the healthcare context.

Similarly, Isherwood and Waterson (2021) used a system-based model to analyze error-related adverse outcomes in healthcare. Still, the gravity of outcomes between the healthcare and manufacturing sector can be very different. Generally, manufacturing is not considered a safety-critical domain, i.e., workers' performance and behavior are rarely associated with catastrophic outcomes leading to death, serious injury or major property losses. Instead, a major concern in the manufacturing context has been the impact of human performance on production quality (Caputo et al., 2017; Kolus et al., 2018; Yung et al., 2020). However, assembly errors can also lead to major safety concerns in some sectors such as aerospace manufacturing (Domínguez, 2020; Gates, 2019).

Despite the differences between safety-critical fields and the manufacturing sector, this study found that AcciMap is an effective way to display and examine the contributory factors associated with quality deficiencies. In this paper, a total of 31 contributory factors were identified during the analysis with the AcciMap method. This result is close to the average number of contributory factors that Waterson et al. (2017) found in a literature review of 27 studies that had used AcciMap. The number of contributory factors among the reviewed papers ranged from 7 to 71. This span reflects that some studies presented a simplified overview of the accident while others went into more detail. We believe that the number of contributory factors identified in the present research adequately describes key complex interdependencies within the manufacturing system. Even if a larger number of contributory factors could have been hypothetically identified, a greater level of detail may risk overloading the AcciMap outcome, making it hard to navigate for the company's managers and decision-makers. If one tries to model as many elements as possible (e.g., an entire factory) in a single model, it can become difficult to make sense of the model.

Indeed, the question of the optimal or ideal number of factors to identify with AcciMap is still an open question. But it is reasonable to think that a very high number could represent a challenge from a managerial point of view as AcciMap does not prioritize the identified factors. A similar situation applies to several other systemic methods. Leveson (2011) acknowledges

that the relative importance of each of the factors identified through a systemic method analysis is challenging to estimate because in complex systems, their potential to generate an undesirable outcome is unknown and hard to oversee. Besides the number of factors, the identification of interactions between them also represents a challenge. Methods such as AcciMap and STAMP place more emphasis on identifying influencing factors and modelling relevant interrelations rather than establishing their relative weight or a more complete picture of their interrelations. However, even if a decision can be taken in situations of partial information or uncertainty, the need to develop tools to support this decision-making process is still relevant when there are many factors to consider and a substantial number of interrelations.

The AcciMap outcome obtained in this article provided an inventory of contributory factors, but this was done without relative weight, which could be used for prioritization. However, a significant contribution of AcciMap to the analysis of error-related quality deficiencies is the mapping of contributory factors, which enables the hypothesizing of relationships across and between the different levels within the manufacturing system. In this way, a holistic view of the nature of the problem being analyzed is generated, a kind of "big picture", which might help managers and decision-makers to better understand the connections between the upper and lower levels of the company's hierarchy. Similarly, the primary function of AcciMap may be viewed as an effective communication tool that uses visual representation to link quality events with their contributory factors. Finally, it demonstrated that various factors across the system could potentially influence the worker's behavior and performance at the bottom of the socio-technical hierarchical structure. In the future, all these elements may support the feasibility analysis and deployment process associated with industry 4.0 technologies for manufacturing.

On another note, AcciMap has also been questioned for its lack of a classification scheme of contributory factors to guide the analysis (Salmon et al., 2012; Underwood et Waterson, 2013). Indeed, with AcciMap, the analysts are free to identify the contributory factors at each level of

the system's hierarchy as there is no associated taxonomy. Thus, it has been argued that AcciMap is more likely to be less reliable compared to methods that provide a taxonomy or a set of categories of contributory factors (Goncalves Filho et al., 2019). This is the case for HFACS (Shappell et Wiegmann, 2000a), which provides a taxonomy of causal factors and divides them into four categories based on the Swiss Cheese Model (Reason, 1990a). Still, in the case of AcciMap, recent results are insufficient to conclude that the use of a context-specific taxonomy of contributory factors would be better than the original generic AcciMap without taxonomy (Goode et al., 2017; Igene, 2020).

Regarding STAMP, this method requires the initial construction of the control structure of the system object of analysis, to model the system's functions from a hierarchical structure perspective. Thus, to apply STAMP, the analyst must have adequate knowledge of the system's functioning and operation to be able to generate the different control loops of the socio-technical system being modeled. According to Salmon et al. (2012), in-depth knowledge of the system in question is required when using STAMP, e.g., regulatory bodies and rules, company procedures, and training programs. Previous studies have recognized that STAMP requires a thorough understanding of the system and an understanding of the principles of control theory to analyze accidents and events (Igene et Johnson, 2020).

Both, AcciMap and STAMP are time-consuming and demand large amounts of information and resources for data collection as it is the case with systemic methods in general (Salmon et al., 2012; Underwood et Waterson, 2014). For this reason, we argue that, from a cost-effective perspective, the use of systemic methods to analyze error-related quality deficiencies in manufacturing is justifiable only in specific cases. These cases include when the quality deficiencies lead to a product safety event and when the analysis serves as an input for decision making (strategical planning). The case presented in this paper corresponds to the latter. Classic quality analysis tools like the Ishikawa diagram and five whys (Fonseca et al., 2015) lack the systemic view necessary for strategic decision-making (Zlatanović et Nikolić, 2017).

STAMP may gain greater relevance in manufacturing as various technologies associated with Industry 4.0 become more widespread in the manufacturing sector. Leveson (2011) clearly states that the development of STAMP primarily responds to the need to analyze systems having relatively high levels of automation. However, it can also be applied to systems with medium to high human involvement. In our case, the assembly process is executed manually with only some technological support. Still, STAMP provided a somewhat unique view of the assembly process from an organizational and control structure perspective. In another STAMP application, to a more manual process in the medical field, i.e., central venous catheterization (Chatzimichailidou et al., 2018), the authors also found beneficial results that added to the existing body of knowledge. This shows to some extent, the versatility of STAMP. In the future, the introduction of several technologies to support manufacturing workers (ex. augmented reality, collaborative robots, exoskeletons) is expected to lead to a more intensive use of digital solutions. These solutions, in conjunction with the cognitive abilities of humans will create hybrid assembly systems (Burggräf et al., 2021). Furthermore, this technological transformation in manufacturing will lead to the emergence of Operator 4.0, which is "understood as a smart and skilled operator who performs not only cooperative work with robots but also work aided by machines and if needed employing human cyber-physical systems (...)." (Romero et al., 2016). In this expected new context, we argue that the analysis of error-related quality deficiencies may benefit even more from the STAMP approach.

Globally, an advantage of AcciMap and STAMP is that they do not necessarily look for a causal path or chain of events. This is very useful when analyzing error-related quality deficiencies in manual assembly because this causal path is difficult or even impossible to establish. At the same time, these two systemic methods made it possible to move the analysis of quality deficiencies from a statistical approach, which is normally applied to quality, toward a case-specific and modeling-based approach. Still, in the context of this article, systemic methods were not used as stand-alone methods. Rather, they were used to expand the boundaries of the analysis of assembly errors beyond HRA and data driven approaches. In this way AcciMap and STAMP enabled the identification of institutional failures (e.g., unclear

responsibilities, poor information flow) rather than worker failures. All of this supports the concept of complementarity, i.e., the idea that a single thing when considered from different perspectives can show different properties (Wilczek, 2021).

The two methods contributed to our specific case by revealing several distinct understandings and insights. First, AcciMap revealed the role that the instability in the supply chain and the associated variations in production levels play on various variables that affect assembly workers' performance. Supply chains in the aerospace manufacturing sector are becoming increasingly complex (Dostaler, 2013), and the disruptions in the aerospace supply chain are a predominant cause of operational delays (Mocenco, 2015). In our case, the production system cannot cope with large perturbations of parts supply. This means that the final assembly process stops for several days before restarting, or the production level is kept significantly lower than usual. A low level of production can negatively influence the assembly worker's performance. According to the Activation Theory, "an individual's psychological activation is required to be sufficiently motivated for effective and efficient performance and to achieve goals. Without this activation the individual is likely to fail the work" (Scott, 1966). The number of distractions and interruptions can also increase due to idle time. On the other side of the coin, the assembly lines experience pressure when production restarts, leading to overtime and disruption in normal work schedules. Consequently, some assembly workers can perform a significant amount of overtime because the company wage policy (negotiated in collective agreement) incentives and allows this. Nonetheless, the use of overtime in manufacturing needs to be subject to trade-offs in terms of quality and productivity because of the adverse effects on these two variables (Jeunet et Bou Orm, 2020).

AcciMap also revealed how the company strategy in information technology impacts the Manufacturing Execution System (MES). This last one requires significant upgrades, particularly when considering that digital assembly instructions need to be more perceptual and provide richer and more immediate sensory inputs (Mattsson et al., 2016). However, this kind of industrial software for manufacturing environments demands a relatively high level of

investment (Chao et Li, 2006). Still, the MES of the company needs to evolve to catch up with the digital transformation era associated with Industry 4.0 (Mantravadi et Møller, 2019). As AcciMap also shows, the necessary upgrade of the MES depends on the availability of resources and the company budget allocation strategy. Our analysis provides elements to justify the investment from a quality perspective and human performance.

STAMP shows that many of the failures in the lower control structure (Figure 8) are conditioned by failures or deficiencies in the upper control structures. For example, deficiencies in the digital assembly instructions can result from the Manufacturing IT System's failure to capture and integrate end-user requirements (assembly workers). The designers of the system architecture need to consider contextual input from users (Wolfartsberger et al., 2019) to meet the challenges of presenting working instructions. Similarly, because Production & Quality Management does not provide clear guidelines on shift scheduling and overtime allocation practices, the assembly line supervisors cannot enforce constraints about the number of hours to assign and the configuration of work shifts.

The application of AcciMap and STAMP presented here was preceded by a 12-month project during which essential information was gathered from primary sources. This contrasts with the limitations that an a posteriori analysis of accidents imposes onto the analyst. Indeed, quite frequently, the studies that applied systemic methods relied largely on the information contained in accident reports (Goncalves Filho et al., 2019; Igene et Johnson, 2020; Kee et al., 2017; Salmon et al., 2012). However, these reports were not written with systemic methods in mind, and this limits the availability and quality of the input information. Also, in many cases, the researchers conducting the systemic analysis had limited or no access to the milieu object of study or lacked additional details from primary sources (Igene et Johnson, 2020). For these reasons, according to Underwood and Waterson (2014), AcciMap and STAMP analyses are summaries of the findings produced by more specific analytical methods, used during the investigation phase.

An avenue that is being explored to close this gap is to empower stakeholders in the use of systemic methods. This is the approach that Canham (2018) used to integrate systemic accident analysis into current practices regarding the investigation of patient safety incidents. The authors showed that the STAMP-based approach guided healthcare stakeholders to consider system design issues and remedial actions, going beyond the individual-based corrective measures proposed by the Root Cause Analysis method. In parallel, Goode et al. (2018) proposed a guide to design a practical, usable incident reporting system based on a systemic thinking approach. According to these authors, incident reporting systems must be capable of collecting data on contributory factors across the overall work system, and factors relating to the immediate context of the event (e.g., front-line workers, environment, and equipment). Still, helping practitioners to translate incident data into prevention strategies that address the systemic causes of accidents is not without challenges (Goode et al., 2016).

5.5.1 Limitations and future directions

There are several limitations to the current study that must be noted. Usually, when analyzing post-facto causes to accidents or events, hindsight bias is a significant concern. According to Dekker (2017), after an accident or an event occurs, it is easy in hindsight to see where things went wrong, what should have or should not have been done, or to judge people or actions in a broader sense. However, throughout the analysis presented in this article, researchers avoided judging the assembly workers' behavior. Consequently, the research primarily focused on the system. Also, methods like AcciMap and STAMP do not concentrate on finding the cause or causes of an accident or event. Instead, they identify plausible pathways associated with different contributory factors or flaws within the system. The intrinsic nature of these methods curtails hindsight bias, particularly in manufacturing (quality issue vs. accident) but it is still a factor to consider.

Another limitation is that the actual mapping/analysis with AcciMap and STAMP was done in an analyst-driven manner. Future studies will require the involvement of multidisciplinary

teams, ideally from all socio-technical levels within the organization. In our study, this involvement occurred during phases prior to the actual analysis with systemic methods. This made it possible to gather the necessary input to populate AcciMap and STAMP methods. Additionally, because we used a case study approach, our results should be interpreted in light of the specific context object of analysis, i.e., complex assembly tasks, one production site, Canadian aerospace industry. Manufacturing systems in sectors other than the aerospace industry, located in other geographical areas or tasks with different physical/cognitive demands, can be expected to show different or additional organizational influencing factors and control flaws.

Additionally, developing a classification scheme of contributory factors for AcciMap specific to quality analysis in the manufacturing sector may be an important contribution to explore. It can support the analysis of multiple incidents and provide a systemic framework to be implemented within incident reporting systems. This taxonomy could be built, for example, based on the recently developed framework linking human performance, ergonomics and quality in manufacturing (Kolus et al., 2018). In the future, as more and more AcciMap applications are made in manufacturing, a meta-analysis of these studies could help to create taxonomies. A meta-analysis involves several teams worldwide studying the same problem and using different research protocols.

5.6 Conclusion

The results presented in this paper support the idea that the analysis of operational risks in manufacturing may benefit from system thinking approaches and methods that have heretofore mostly been used in safety-critical domains for accident analysis and investigation. To the best of our knowledge, the use of the systemic methods STAMP and AcciMap for analyzing error-related quality deficiencies in manual assembly has not been previously reported in the literature. Both methods provided a framework for analyzing quality deficiencies by focusing on manufacturing system failures rather than on assembly-worker errors. However, we found

that modeling the behavior of the manufacturing assembly system using system thinking methods implies a relatively high level of knowledge about the system itself. One way to take up this challenge involves using strategies such as action research to ensure that the analyst (or a team of analysts) takes ownership of the characteristics and behaviors inherent to the manufacturing system while directly interacting with the field and stakeholders. Similarly, quality specialists could be trained to apply systemic methods for the analysis of error-related quality deficiencies. In this way, knowledge could be transferred to daily practice.

One aspect that seems to be a limitation in systemic methods when facing operational risk management in manufacturing is that these methods lack a prioritization framework. Thus, managers might find it hard to translate results into an action plan or allocate a budget because priorities are not defined. In the case of AcciMap, the development of a taxonomy of contributory factors specific to quality analysis in manual assembly may be beneficial to support analysts. Establishing a better framework of reference may also increase the reliability of the method. Within Industry 4.0's transformations, the system thinking approach may provide the needed support to build resilient manufacturing systems, i.e., a manufacturing system that identifies, assesses, and mitigates risk in its manufacturing operations and overcomes vulnerabilities in its manufacturing activities (Romero et al., 2021). Finally, we believe that systemic methods do not replace classical methods (e.g., HRA, FTA), but rather they complete the analysis and offer a different perspective. Since they do not break down the system, we can see interactions that we would not have been visible with traditional methods.

CONCLUSION

La recherche menée dans cette thèse nous permet de parvenir à une série de conclusions pertinentes tant pour l'avancement de la recherche que pour l'organisation partenaire. Nonobstant, en tant qu'étude de cas, nos conclusions doivent être interprétées à la lumière des caractéristiques propres au contexte spécifique de réalisation de cette recherche : manufacture aéronautique canadienne, assemblage manuel complexe, demandes cognitives relativement plus importantes par rapport aux demandes physiques de la tâche. La transposition de nos résultats et des conclusions qui en découlent à d'autres contextes avec des caractéristiques sensiblement différentes doit se faire avec discernement.

Les résultats de l'analyse statistique dans le registre de l'entreprise montrent que certaines tâches sont particulièrement vulnérables aux erreurs (tâches critiques) comme c'est le cas de l'installation des supports de fixation (bracket), l'installation des colliers de serrage coussiné (cushioned loop clamp) et l'installation de capuchons d'entrée (caps-covers). L'analyse de la fiabilité humaine indique qu'il existe plusieurs modes d'erreur ainsi que plusieurs facteurs qui augmentent la probabilité d'erreur lors de l'exécution des tâches critiques. Parmi ces facteurs on trouve, la géométrie de pièces d'assemblage, des lacunes importantes dans la conception et l'affichage des instructions de travail, le manque de rétroaction immédiate du système et le manque de moyens afin de suivre l'évolution de la tâche. Les distractions et les interruptions représentent également des facteurs d'influence sur l'erreur dans le contexte étudié. De cette façon, il a été possible d'identifier plusieurs éléments qui peuvent être améliorés soit à partir d'une approche traditionnelle ou bien à partir de l'utilisation de technologies numériques. Nos résultats représentent ainsi une contribution importante qui est alignée avec les tendances récentes en recherche par rapport à l'intersection entre l'erreur humaine, l'assemblage complexe et les technologies de fabrication numérique.

Le questionnaire qui a été administré auprès d'un groupe de travailleurs pour évaluer la fatigue et la charge de travail montre que la perception de la charge de travail globale, le fait de

travailler le quart de soir et la fatigue ressentie au début de la journée de travail sont des prédicteurs des niveaux de fatigue critiques chez les travailleurs (potentiellement nuisibles à la performance). Cela semble indiquer, en partie, que des aspects liés à la gestion des horaires de travail pourraient avoir un impact négatif sur la fatigue. Le questionnaire a aussi montré que les travailleurs perçoivent la composante cognitive de la charge de travail comme la plus importante parmi les six composantes de la charge de travail qui ont été évaluées. Ce qui apparaît comme le résultat de la nature complexe de l'assemblage aéronautique, et plus particulièrement de l'assemblage des moteurs d'avion. Ce résultat nous permet de faire une distinction entre l'assemblage complexe, et l'assemblage de nature plus répétitive et physique. Ce sont deux profils différents d'assemblage manufacturier et doivent être abordés différemment. Notre recherche montre alors l'importance de tenir compte des aspects chronobiologiques et cognitifs de l'assemblage manuel complexe, deux aspects qui ont été relativement peu abordés dans le contexte manufacturier.

L'analyse avec approche systémique nous a fourni une vision holistique du système de production à la lumière de l'erreur humaine. Nous avons identifié, par exemple, que l'instabilité dans l'approvisionnement de pièces provoque une discontinuité du flux de production qui à son tour génère des périodes de faible et de forte production. Alors qu'une forte production entraîne le recours à des heures supplémentaires et à des horaires de travail atypiques, une faible production peut mener à plus de distractions et d'interruptions. De manière semblable, la stratégie technologique de l'entreprise et la conception des instructions de travail, qui ne tient pas compte des besoins de l'utilisateur final, sont d'autres exemples de facteurs organisationnels qui exercent une influence sur la performance des travailleurs. Ces facteurs dépassent l'environnement immédiat des travailleurs et peuvent se trouver à différents niveaux dans l'organisation. Au mieux de nos connaissances c'est la première fois que des techniques d'analyse de risque systémique (AcciMap, STAMP, HFACS) ont été utilisées dans un contexte de manufacture pour l'analyse des erreurs d'assemblage. L'orientation pratique de la demande faite par le partenaire industriel fournit une grande richesse en termes d'accès aux sources primaires d'information et acteurs clés.

RECOMMANDATIONS

Plusieurs recommandations découlent de nos travaux de recherche. Nous faisons ici un bilan global de ces recommandations afin de motiver l'exploration de solutions qui ont été jugées pertinentes à la lumière de nos résultats. Nous croyons que dans le contexte de la manufacture aérospatiale et l'assemblage de moteurs d'avions, une attention particulière doit être accordée à la charge de travail cognitive, car celle-ci peut avoir un impact sur la fatigue et la dégradation de la performance. Cela devrait se traduire par une stratégie d'intervention qui tient compte de l'interaction entre les travailleurs et les instructions de travail notamment en ce qui concerne le contenu des instructions, le mode d'affichage et le réalisme visuel des images. Ce sont des éléments clés dans le but de faciliter la compréhension et la création du modèle mental adéquat aux instructions de travail établies. Dans ce sens il est important, lors de la mise à jour des instructions, de tenir compte des besoins des travailleurs (utilisateurs finaux), surtout, en ce qui concerne les aspects cognitifs. Par exemple, l'affichage des instructions de bas réalisme dans un écran de dimensions relativement réduites peut compromettre la performance. Cela est particulièrement critique quand des pièces associées à une géométrie et orientation spatiale complexe sont en jeu (supports de fixation et colliers de serrage coussinés).

L'adoption et l'intégration de certaines technologies de soutien à l'humain dans le contexte de l'Industrie 4.0 représentent une piste de solution à explorer et devraient être considérées dans la stratégie de développement technologique de l'organisation. La réalité augmentée, en particulier quand celle-ci est intégrée à un système de guidage de l'assemblage, peut permettre une rétroaction immédiate et le suivi de l'évolution de la tâche. Nonobstant, des aspects de convivialité/performance/utilité doivent toujours être déterminés. À titre d'exemple, le type de réalité augmentée qui serait optimal dans le contexte objet d'étude (casque, tablette, projection de lumière, etc.) est une question ouverte.

Nos résultats ont souligné le fait qu'une surcharge des heures de travail accompagnée des horaires de travail atypiques pourrait contribuer également à la fatigue et à une possible

détérioration de la performance. De telles pratiques de gestion du temps de travail devraient être évitées ou minimisées (ex. en assurant des niveaux de production stables) à défaut de quoi un guide clair sur certaines limites serait nécessaire afin de mitiger ces effets. Dans tous les cas, les stratégies de solutions doivent être axées sur une perspective de système, c.-à-d. prendre en compte les facteurs d'influence à plusieurs niveaux dans la structure organisationnelle. Bien que les technologies 4.0 comme la réalité augmentée offrent un potentiel intéressant, d'autres solutions de type "classique" sont également importantes. Dans les deux cas, l'analyse avec l'approche de système constitue un élément essentiel afin de réussir le processus de mise en place de solutions pour augmenter la performance et diminuer le risque d'erreur.

ANNEXE I

LISTE DES PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE

Articles de revue avec comité de lecture

1. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2022). Applying AcciMap and STAMP to the analysis of human errors in complex manual assembly. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 1-20. doi:10.1002/hfm.20964
2. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Evaluation of Fatigue and Workload among Workers Conducting Complex Manual Assembly in Manufacturing. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 9(1), 49-63. doi:10.1080/24725838.2021.1997835
3. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Classification and quantification of human error in manufacturing: a case study in complex manual assembly. *Applied Sciences*, 11(2), 749. doi:10.3390/app11020749

Article de conférence avec comité de lecture

1. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2022). Analysis of error-related quality deficiencies in manufacturing using systems approach: application of the HFACS framework. Accepted to the 13th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2022), New York, USA, July 24-28.
2. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Application of SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) as an Alternative to Predict and Prevent Human Error in Manual Assembly. In N. L. Black, W. P. Neumann, & I. Noy (Eds.), *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)* (pp. 445-453). Cham: Springer International Publishing.
3. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Evaluation of shift work scheduling and overtime allocation practices using the HSE Fatigue Index: application on complex manual assembly. Paper presented at the Kongress der Gesellschaft für

Arbeitswissenschaft [Congress of the German Society of Ergonomics], Bochum, Germany.

4. Torres, Y., & Nadeau, S. (2020). Operator 4.0 in manufacturing: trends, potential technologies and future perspectives. Paper presented at the Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft [Congress of the German Society of Ergonomics], Berlin, Germany.
5. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2019). Application of human errors analysis in manufacturing: A proposed intervention framework and techniques selection. Paper presented at the Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft [Congress of the German Society of Ergonomics], Dresden, Germany.

Articles de vulgarisation scientifique

1. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2021). Work Schedules, Overtime, and Fatigue in Aerospace Manufacturing. Substance ÉTS. <https://substance.etsmtl.ca/en/work-schedules-overtime-fatigue-aerospace-manufacturing>
2. Torres, Y., & Nadeau, S. (2020). The Future in Manufacturing—The Rise of Operator 4.0. Substance ÉTS. <https://substance.etsmtl.ca/en/future-manufacturing-rise-operator-4-0>
3. Torres, Y., Nadeau, S., & Landau, K. (2019). Assembly Guidance Systems in Aerospace Manufacturing. Substance ÉTS. <https://substance.etsmtl.ca/systemes-guider-assemblage-fabrication-aerospatiale>
4. Torres, Y., Nadeau, S., Landau, K. (2021). Measuring the Link Between Fatigue and Workload Among Workers in Complex Manual Assembly. ISE, December, 53(12), 51-52

Rapports de recherche

1. Torres Medina, Y., Nadeau, S., Landau, K. (2020). Study of fatigue and workload in aircraft engine assembly. Rapport de recherche confidentiel, École de technologie supérieure (Pratt & Whitney Canada), 47 pages. Financement (Mitacs, CRSNG)

2. Torres Medina, Y., Nadeau, S., Landau, K. (2019). Study of human errors in aircraft engine assembly. Rapport de recherche confidentiel, École de technologie supérieure (Pratt & Whitney Canada), 86 pages. Financement (Mitacs, CRSNG)

ANNEXE II

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE SOUS-PROJET NO.1 : ANALYSE DE LA FIABILITÉ HUMAINE



Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure

7 novembre 2018

Titre du projet : Étude de l'erreur humaine dans le processus d'assemblage des moteurs d'avions

Responsable : Sylvie Nadeau

Numéro de référence : H20181004

Type de demande : Nouvelle

AUTORISATION DE PROCÉDER

Madame Nadeau,

Le projet mentionné en rubrique a été déposé le 26 octobre 2018 pour évaluation par le Comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS (CÉR). La présente lettre est pour vous informer que nous avons procédé à l'évaluation du dossier en comité délégué.

Liste des documents soumis :

- Formulaire de présentation allégé
- Feuilles d'information – versions française et anglaise

J'ai le plaisir de vous informer que le dossier présenté répond aux exigences éthiques établies par le CÉR de l'ÉTS pour les projets de recherche évalués selon la procédure d'autorisation. Le projet est donc autorisé ; vous pouvez dès à présent débiter le recrutement des participants.

Dans la continuité de cette autorisation, nous vous demandons de considérer attentivement les points suivants :

1. Veuillez observer une conduite responsable tout au long de vos travaux de recherche;
2. Veuillez porter une attention particulière à la protection de la confidentialité des données qui seront recueillies durant le projet;
3. Si vous envisagez de publier les résultats de cette recherche dans un congrès scientifique (colloque, etc.), assurez-vous qu'aucune information identificatoire ne soit dévoilée.

Veuillez agréer, Madame Nadeau, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Mathias Glaus, Ing., Ph.D.
Président, Comité d'éthique de la recherche

ANNEXE III

CERTIFICAT D'ÉTHIQUE SOU-PROJET NO.2 : ÉTUDE DE LA FATIGUE ET LA CHARGE DE TRAVAIL



Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure

8 mai 2019

Titre du projet : Étude de l'erreur humaine dans le processus d'assemblage des moteurs d'avions

Responsable : Sylvie Nadeau

Numéro de référence : H20190301

Type de demande : Nouvelle

APPROBATION FINALE

Madame Nadeau,

Nous accusons réception du dossier modifié et des documents demandés selon les recommandations émises par le Comité d'éthique de la recherche (CÉR) dans sa lettre du 18 avril 2019. Après révision, le dossier est conforme. J'ai donc le plaisir de vous informer que votre projet peut aller de l'avant.

Vous trouverez, jointe à la présente, une copie du formulaire d'information et de consentement approuvé par le CÉR (version PDF datée du 8 mai 2019). [Veuillez utiliser cette version du document pour le recrutement de vos participants.](#)

L'approbation éthique de votre projet est valable pour une année à compter de la date d'approbation finale. Si vous envisagez de poursuivre vos travaux de recherche au-delà de la date d'échéance mentionnée ci-bas, vous devrez présenter au CÉR une demande de renouvellement de l'approbation éthique. Si votre projet se termine avant cette date d'échéance, vous devrez fournir au CÉR un rapport de fin de projet.

En acceptant le présent certificat éthique, vous vous engagez à :

- Observer une conduite responsable tout au long de vos travaux de recherche;
- Informer dès que possible le CÉR de tout changement apporté au projet ou tout événement imprévu qui surviendrait au cours d'une expérimentation;
- Respecter les conditions de confidentialité et de protection des renseignements et des données, telles qu'énoncées dans le dossier et approuvées par le CÉR.

Veuillez agréer, Madame Nadeau, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Laurence Marck
Coordonnatrice, Comité d'éthique de la recherche

ÉCHÉANCE DE L'APPROBATION
8 mai 2020

REMISE DU RAPPORT FINAL
Au plus tard le 31 décembre 2020

APPENDICE A

DOCUMENTS : COLLECTE DE DONNÉES

--DÉBUT DU QUART--

Questionnaire d'évaluation de la fatigue au travail.

ID participant : _____ Date : _____ Heure : _____

Heure du coucher: _____ Heure de réveil: _____

Le cas échéant, veuillez estimer le nombre d'heures de sommeil dans les 24h précédent ce quart de travail :

Quart : Jour ☐ Soir ☐ Week-end ☐ Sexe M ☐ F ☐ Âge :

Poste ou station : _____ Ancienneté : _____

Ligne d'assemblage : _____

Encerclez le numéro de l'énoncé qui décrit le mieux ce que vous ressentez **En Ce Moment**

1	Complètement alerte, bien éveillé, très énergique
2	Très vif, réactif, mais pas à un sommet
3	Bon, assez frais et dispos
4	Un peu fatigué, moins frais et dispos
5	Moyennement fatigué, en baisse
6	Extrêmement fatigué, très difficile de se concentrer
7	Complètement épuisé, incapable de fonctionner de manière efficace, prêt à tomber d'épuisement

FIN DU QUART**Questionnaire d'évaluation de la fatigue au travail.**

ID participant :	Date : _____	Heure : _____

Encerchez le numéro de l'énoncé qui décrit le mieux ce que vous ressentez **En Ce Moment**

1	Complètement alerte, bien éveillé, très énergique
2	Très vif, réactif, mais pas à un sommet
3	Bon, assez frais et dispos
4	Un peu fatigué, moins frais et dispos
5	Moyennement fatigué, en baisse
6	Extrêmement fatigué, très difficile de se concentrer
7	Complètement épuisé, incapable de fonctionner de manière efficace, prêt à tomber d'épuisement

Évaluation de la charge de travail

INFORMATION IMPORTANTE : Nous allons à présent décrire la technique qui sera utilisée pour évaluer vos « expériences » pendant la réalisation de votre travail. De manière générale, nous évaluons la « charge de travail » que vous subissez. Les facteurs qui influencent la charge de travail proviennent de la tâche elle-même de votre ressenti par rapport à votre propre performance, de l'effort que vous avez fourni, du stress et de la frustration que vous avez ressenti. Veuillez lire attentivement la description de six facteurs qui vous seront demandés d'évaluer.

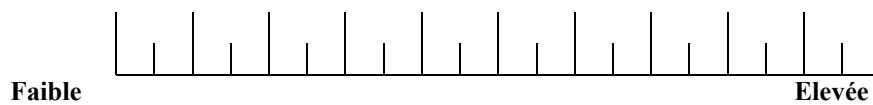
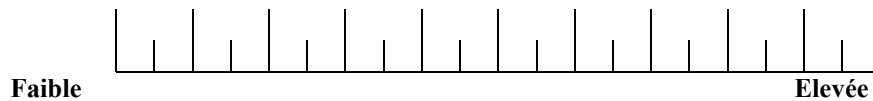
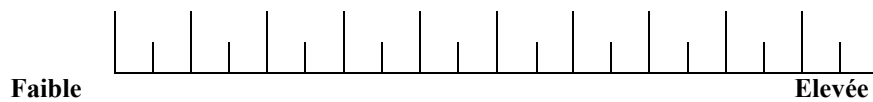
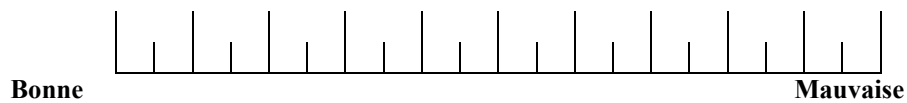
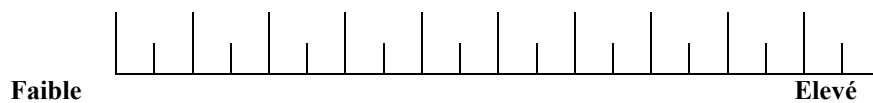
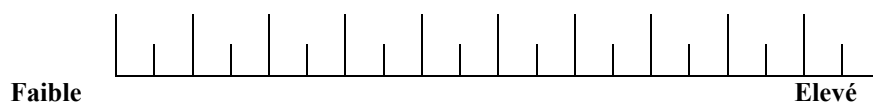
DEFINITIONS DES ECHELLES D'EVALUATION – NASA TLX		
Titre	Descripteur	Descriptions
EXIGENCE MENTALE	Faible/Elevée	Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise (ex. réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile ou contraignante, simple ou complexe ?
EXIGENCE PHYSIQUE	Faible/Elevée	Quelle a été l'importance de l'activité physique requise (ex. pousser, porter, tourner, marcher, activer, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile ou pénible, douce ou fatigante, calme ou active ?
EXIGENCE TEMPORELLE	Faible/Elevée	Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la vitesse ou le rythme avec lesquels la tâche ou les éléments de la tâche sont apparus et la rapidité nécessaire pour l'accomplissement de l'objectif ? Etait-ce un rythme lent et doux ou rapide et précipité ?
PERFORMANCE	Bonne/Mauvaise	Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ? Dans quelle mesure pensez-vous avoir atteint les objectifs déterminés par la tâche ?
EFFORT	Faible/Elevé	Quel effort avez-vous fourni pour exécuter votre tâche (mentalement et physiquement) ?
NIVEAU DE FRUSTRATION	Faible/Elevé	Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance ?

ID participant :

Date : _____

Heure : _____

INSTRUCTIONS: Vous évalueriez la tâche en mettant une **X** sur chaque échelle à l'endroit qui correspond le mieux à votre expérience. Chaque ligne comporte un descripteur à chaque extrémité qui code l'échelle. Notez que, pour l'échelle « performance », l'appréciation va de « bon » sur la gauche à « mauvais » sur la droite, cet ordre peut être gênant pour certaines personnes. Faites bien attention à vos réponses, considérez chaque échelle individuellement. Vos cotations joueront un rôle important dans l'évaluation qui va en résulter.

EXIGENCE MENTALE**EXIGENCE PHYSIQUE****EXIGENCE TEMPORELLE****PERFORMANCE****EFFORT****NIVEAU DE FRUSTRATION**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Åhsberg, E., F. Garnberale et A. Kjellberg. 1997. « Perceived quality of fatigue during different occupational tasks Development of a questionnaire ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 20, n° 2, p. 121-135.
- Åkerstedt, T., et M. Gillberg. 1990. « Subjective and objective sleepiness in the active individual ». *International Journal of Neuroscience*, vol. 52, n° 1-2, p. 29-37.
- Alizon, F., S. B. Shooter et T. W. Simpson. 2009. « Henry Ford and the Model T: lessons for product platforming and mass customization ». *Design Studies*, vol. 30, n° 5, p. 588-605.
- Alkan, B. 2019. « An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity ». *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 13, n° 3, p. 1145-1157.
- Alkan, B., D. Vera, M. Ahmad, B. Ahmad et R. Harrison. 2016. « A Model for Complexity Assessment in Manual Assembly Operations Through Predetermined Motion Time Systems ». *Procedia CIRP*, vol. 44, p. 429-434.
- Alkan, B., D. Vera, M. Ahmad, B. Ahmad et R. Harrison. 2018. « Complexity in manufacturing systems and its measures: A literature review ». *European J. of Industrial Engineering*, vol. 12, p. 116-150.
- Allmark, P., et K. Machaczek. 2018. « Realism and Pragmatism in a mixed methods study ». *Journal of Advanced Nursing*, vol. 74, n° 6, p. 1301-1309.
- Alogla, A. A., et M. Alruqi. 2021. « Aircraft Assembly Snags: Human Errors or Lack of Production Design? ». *Aerospace*, vol. 8, n° 12, p. 391.
- Alves, J. B., B. Marques, C. Ferreira, P. Dias et B. S. Santos. 2021. « Comparing augmented reality visualization methods for assembly procedures ». *Virtual Reality*.
- Amagoh, F. 2016. « Systems and Complexity Theories of Organizations ». In *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance*, sous la dir. de Farazmand, Ali. Amagoh2016. p. 1-7. Cham: Springer International Publishing.
- Amir, A. R., et S. I. Weiss. 2019. « Aerospace industry ». In *Encyclopædia Britannica*. <<https://www.britannica.com/technology/aerospace-industry>>. Consulté le 25 Mai 2020.

- Annett, J. 2002. « A note on the validity and reliability of ergonomics methods ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 3, n° 2, p. 228-232.
- Annett, J. 2003. « Hierarchical Task Analysis ». In *Handbook of Cognitive Task Design*, sous la dir. de Hollnagel, Erik, 1st. p. 33-51. CRC Press.
- Armacost, R., D. Balakrishnan et J. Pet-Armacost. 2002. « Design for Remanufacturability Using QFD ». *Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference: IERC-2002*.
- Arnold, R. D., et J. P. Wade. 2015. « A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach ». *Procedia Computer Science*, vol. 44, p. 669-678.
- Atsuko, E. 2014. « "Assembly-navigation System" that Supports Manufacturing around the World ». < http://www.hitachi.com/rd/portal/contents/story/assembly_navigation/index.html >. Consulté le 15 October 2019.
- Baber, C., et N. A. Stanton. 1996. « Human error identification techniques applied to public technology: predictions compared with observed use ». *Applied Ergonomics*, vol. 27, n° 2, p. 119-131.
- Backstrand, G., P. Thorvald, L. J. De Vin, D. Hogberg et K. Case. 2008. « The impact of information presentation on work environment and product quality: a case study ». In *Fortieth Annual Conference of the Nordic Ergonomics Society, NES2008*. (2008). Nordic Ergonomics Society.
- Báez, Y. A., M. A. Rodríguez, J. Limón et D. A. Tlapa. 2014. « Model of human reliability for manual workers in assembly lines ». In *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. (9-12 Dec. 2014), p. 1448-1452.
- Bajpai, P. 2018. « Chapter 22 - Total Quality Management ». In *Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition)*, sous la dir. de Bajpai, Pratima. p. 443-454. Elsevier.
- Bao, S. 2015. « Chapter 20 - Mechanical stress ». In *Handbook of Clinical Neurology*, sous la dir. de Lotti, Marcello, et Margit L. Bleecker. Vol. 131, p. 367-396. Elsevier.
- Bao, S., S. E. Mathiassen et J. Winkel. 1996. « Ergonomic effects of a management-based rationalization in assembly work — a case study ». *Applied Ergonomics*, vol. 27, n° 2, p. 89-99.
- Barker, L. M., et M. A. Nussbaum. 2011. « The effects of fatigue on performance in simulated nursing work ». *Ergonomics*, vol. 54, n° 9, p. 815-829.

- Bashan, A., et S. Kordova. 2021. « Globalization, quality and systems thinking: integrating global quality Management and a systems view ». *Heliyon*, vol. 7, n° 2, p. e06161.
- Battini, D., M. Calzavara, A. Persona et F. Sgarbossa. 2017. « Additional effort estimation due to ergonomic conditions in order picking systems ». *International Journal of Production Research*, vol. 55, n° 10, p. 2764-2774.
- Berlin, C., M. W. Bergman, M. B. Chafi, A.-C. Falck et R. Örtengren. 2021. « A Systemic Overview of Factors Affecting the Cognitive Performance of Industrial Manual Assembly Workers ». In *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)*, sous la dir. de Black, Nancy L., W. Patrick Neumann et Ian Noy. p. 371-381. Cham: Springer International Publishing.
- Beuß, F., J. Sender et W. Flügge. 2019. « Ergonomics Simulation in Aircraft Manufacturing – Methods and Potentials ». *Procedia CIRP*, vol. 81, p. 742-746.
- Binoosh, S. A., G. M. Mohan et D. Bijulal. 2017. « Assessment and prediction of industrial workers' fatigue in an overhead assembly job ». *South African Journal of Industrial Engineering*, vol. 28, n° 1, p. 164-175.
- Blackert, M., C. Kern, P. Refflinghaus et M. Trostmann. 2019. « Quality Improvement in Manual Assembly by Software-based Evaluation of Human Misconduct ». In *29th European Safety and Reliability Conference (ESREL)*. (Hannover, Germany, 22-26 September), sous la dir. de Beer, Michael, et Enrico Zio, p. 361-368. European Safety and Reliability Association.
- Blais, G. 2011. « Méthodologie de sélection d'anti-erreur à l'assemblage par calcul de l'efficacité et du coût global d'une application ». Mémoire de maîtrise Montréal, Canada, École de technologie supérieure.
- Blichfeldt, B. S., et J. R. Andersen. 2006. « Creating a wider audience for action research: Learning from case-study research ». *Journal of Research Practice*, vol. 2, n° 1, p. D2-D2.
- Boeing. 2013. *Maintenance Error Decision Aid (MEDA)-User's Guide*. The Boeing Company: Seattle, WA, 73 p.
<http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_2_07/article_03_1.html>. Consulté le 25 Février 2018.

- Bohn, D. 2019. « Microsoft's HoloLens 2: a \$3,500 mixed reality headset for the factory, not the living room ». In *The Verge*.
 <<https://www.theverge.com/2019/2/24/18235460/microsoft-hololens-2-price-specs-mixed-reality-ar-vr-business-work-features-mwc-2019>>. Consulté le 25 Mars 2019.
- Boivin, D. B., et P. Boudreau. 2014. « Impacts of shift work on sleep and circadian rhythms ». *Pathologie Biologie*, vol. 62, n° 5, p. 292-301.
- Böllhoff, J., J. Metternich, N. Frick et M. Kruczek. 2016. « Evaluation of the Human Error Probability in Cellular Manufacturing ». *Procedia CIRP*, vol. 55, p. 218-223.
- Booher, H. R., et G. M. Hewitt. 1990. « Manprint Tools and Techniques ». In *Manprint: An Approach to Systems Integration*, sous la dir. de Booher, Harold R., p. 343-390. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Boothroyd, G. 1994. « Product design for manufacture and assembly ». *Computer-Aided Design*, vol. 26, n° 7, p. 505-520.
- Boothroyd, G. 1996. « Design for Manufacture and Assembly: The Boothroyd-Dewhurst Experience ». In *Design for X: Concurrent engineering imperatives*, sous la dir. de Huang, G. Q. Boothroyd 1996. p. 19-40. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Borg, G. 1982. « A category scale with ratio properties for intermodal and interindividual comparisons ». In *Proceedings of the 22nd International Congress of Psychology*, sous la dir. de Geissler, H.G., et P. Petzol. p. 25-34. Coll. « Psychophysical judgment and the process of perception ». Amsterdam, The Netherlands: North Holland Publishing Co.
- Boring, R., E. Roth, O. Straeter, K. Laumann, H. Blackman, J. Oxstrand et J. Persensky. 2010. « Is Human Reliability Relevant to Human Factors? ». In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. (USA) Vol. 53. HFES*.
- Boring, R. L. 2010. « How Many Performance Shaping Factors are Necessary for Human Reliability Analysis? ». *10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference (PSAM10), Seattle, WA, June 7-11*.
- Bosch, T., S. E. Mathiassen, B. Visser, M. P. d. Looze et J. H. v. Dieën. 2011. « The effect of work pace on workload, motor variability and fatigue during simulated light assembly work ». *Ergonomics*, vol. 54, n° 2, p. 154-168.
- Bottani, E., et G. Vignali. 2019. « Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade ». *IISE Transactions*, vol. 51, n° 3, p. 284-310.

- Botti, L., C. Mora et A. Regattieri. 2017. « Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 111, p. 481-491.
- Boudreau, P., S. Lafrance et D. B. Boivin. 2018. « Alertness and psychomotor performance levels of marine pilots on an irregular work roster ». *Chronobiology International*, vol. 35, n° 6, p. 773-784.
- Bragança, S., E. Costa, I. Castellucci et P. M. Arezes. 2019. « A Brief Overview of the Use of Collaborative Robots in Industry 4.0: Human Role and Safety ». In *Occupational and Environmental Safety and Health*, sous la dir. de Arezes, Pedro M., João S. Baptista, Mónica P. Barroso, Paula Carneiro, Patrício Cordeiro, Nélson Costa, Rui B. Melo, A. Sérgio Miguel et Gonçalo Perestrelo. p. 641-650. Cham: Springer International Publishing.
- Brands, J. 2018. « Tightening technology 4.0: Flexible and transparent production with decentralized intelligence ». In *Factory Automation*.
<<https://community.boschrexroth.com/t5/Rexroth-Blog/Tightening-technology-4-0-Flexible-and-transparent-production/ba-p/151>>. Consulté le 5 Mars 2019.
- Branford, K. 2011. « Seeing the big picture of mishaps: Applying the AcciMap approach to analyze system accidents ». *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, vol. 1, n° 1, p. 31-37.
- Branford, K., A. Hopkins et N. Naikar. 2009. « Guidelines for AcciMap analysis ». In *Learning from high reliability organisations*, sous la dir. de Hopkins, Andrew. Sydney: CCH Australia Ltd.
- Breque, M., L. De Nul et A. Petridis. 2021. « Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry ». Luxembourg: Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), 48 p.
- Brolin, A., G. Bäckstrand, D. Högberg et K. Case. 2011. « The use of kitting to ease assemblers' cognitive workload ». In *43rd Annual Nordic Ergonomics Society Conference, NES 2011*. (Oulu, Finland 18-21 September), p. 77-82.
- Brolin, A., P. Thorvald et K. Case. 2017. « Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly ». *Production & Manufacturing Research*, vol. 5, n° 1, p. 141-163.

- Bruder, R., H. Rademacher, K. Schaub et C. Geiss. 2009. « Modular Concepts for Integrating Ergonomics into Production Processes ». In *Industrial Engineering and Ergonomics – Visions, Concepts, Methods and Tools*, sous la dir. de Schlick, Christopher M., p. 383-394. Springer Berlin Heidelberg.
- Bubb, H. 2005. « Human reliability: A key to improved quality in manufacturing ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 15, n° 4, p. 353-368.
- Burggräf, P., M. Dannapfel, T. Adlon et N. Föhlisch. 2021. « Adaptive assembly systems for enabling agile assembly – Empirical analysis focusing on cognitive worker assistance ». *Procedia CIRP*, vol. 97, p. 319-324.
- Cagli, A., M. Kechidi et R. Levy. 2012. « Complex product and supplier interfaces in aeronautics ». *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 23, n° 6, p. 717-732.
- Calixto, E. 2016. « Chapter 5 - Human Reliability Analysis ». In *Gas and Oil Reliability Engineering (Second Edition)*, sous la dir. de Calixto, Eduardo. p. 471-552. Boston: Gulf Professional Publishing.
- Camillo, J. 2010. « Error-Proofing With Power Tools ». In *Assembly Magazine*.
<<https://www.assemblymag.com/articles/87830-error-proofing-with-power-tools>>.
Consulté le 10 Mai 2019.
- Caputo, A. C., P. M. Pelagagge et P. Salini. 2015. « Modeling Errors in Kitting Processes for Assembly Lines Feeding ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n° 3, p. 338-344.
- Caputo, A. C., P. M. Pelagagge et P. Salini. 2017. « Modelling human errors and quality issues in kitting processes for assembly lines feeding ». *Computers & Industrial Engineering*, vol. 111, p. 492-506.
- Carayon, P., P. Hancock, N. Leveson, I. Noy, L. Sznclwar et G. van Hootegem. 2015a. « Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety – developing the conceptual framework ». *Ergonomics*, vol. 58, n° 4, p. 548-564.
- Carayon, P., S. Kianfar, Y. Li, A. Xie, B. Alyousef et A. Wooldridge. 2015b. « A systematic review of mixed methods research on human factors and ergonomics in health care ». *Applied Ergonomics*, vol. 51, p. 291-321.
- CCPS. 2004. « Qualitative and Quantitative Prediction of Human Error in Risk Assessment ». In *Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety*. p. 201-245. Center for Chemical Process Safety.

- CDC. 2017. « Short Sleep Duration Among US Adults ». Centers for Disease Control, U.S. < https://www.cdc.gov/sleep/data_statistics.html >. Consulté le 3 Novembre 2020.
- Chadalavada, R. T., H. Andreasson, R. Krug et A. J. Lilienthal. 2015. « That's on my mind! robot to human intention communication through on-board projection on shared floor space ». In *2015 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. p. 1-6. IEEE.
- Chao, L., et Q. Li. 2006. « Manufacturing Execution Systems (MES) assessment and investment decision study ». In *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. (8-11 Oct. 2006) Vol. 6, p. 5285-5290.
- Chatzimichailidou, M. M., J. Ward, T. Horberry et P. J. Clarkson. 2018. « A Comparison of the Bow-Tie and STAMP Approaches to Reduce the Risk of Surgical Instrument Retention ». *Risk Analysis*, vol. 38, n° 5, p. 978-990.
- Christmansson, M., L. Medbo, G. Å. Hansson, K. Ohlsson, J. Unge Byström, T. Möller et M. Forsman. 2002. « A case study of a principally new way of materials kitting—an evaluation of time consumption and physical workload ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 30, n° 1, p. 49-65.
- Conti, T. 2010. « Systems thinking in quality management ». *The TQM Journal*, vol. 22, n° 4, p. 352-368.
- Cooper, R., et M. Foster. 1971. « Sociotechnical systems ». *American Psychologist*, vol. 26, n° 5, p. 467-474.
- Corlett, E. N. 2000. « Ergonomics and ethics in a changing society ». *Applied Ergonomics*, vol. 31, n° 6, p. 679-683.
- Correia, D., F. J. G. Silva, R. M. Gouveia, T. Pereira et L. P. Ferreira. 2018. « Improving manual assembly lines devoted to complex electronic devices by applying Lean tools ». *Procedia Manufacturing*, vol. 17, p. 663-671.
- Creswell, J. W., et J. D. Creswell. 2017. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications.
- Dadashzadeh, M., R. Abbassi, F. Khan et K. Hawboldt. 2013. « Explosion modeling and analysis of BP Deepwater Horizon accident ». *Safety Science*, vol. 57, p. 150-160.
- Dallat, C., P. M. Salmon et N. Goode. 2018. « Identifying risks and emergent risks across sociotechnical systems: the NETworked hazard analysis and risk management system (NET-HARMS) ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 19, n° 4, p. 456-482.

- Das, A. 2013. « 3 - Testing and statistical quality control in textile manufacturing ». In *Process Control in Textile Manufacturing*, sous la dir. de Majumdar, Abhijit, Apurba Das, R. Alagirusamy et V. K. Kothari. p. 41-78. Woodhead Publishing.
- Davis, K. G., C. R. Reid, D. D. Rempel et D. Treaster. 2020. « Introduction to the Human Factors Special Issue on User-Centered Design for Exoskeleton ». *Human Factors*, vol. 62, n° 3, p. 333-336.
- De Vries, J., H. J. Michielsen et G. L. Van Heck. 2003. « Assessment of fatigue among working people: a comparison of six questionnaires ». *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 60, n° suppl 1, p. i10.
- Dehais, F., A. Lafont, R. Roy et S. Fairclough. 2020. « A Neuroergonomics Approach to Mental Workload, Engagement and Human Performance ». *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, n° 268.
- Dekker, S. 2014. *The Field Guide to Understanding 'Human Error'*. CRC Press, 248 p.
- Dekker, S. W. A. 2017. « Rasmussen's legacy and the long arm of rational choice ». *Applied Ergonomics*, vol. 59, p. 554-557.
- Dhillon, B. S. 1999. *Engineering Maintainability:: How to Design for Reliability and Easy Maintenance*. Elsevier.
- Dhillon, B. S. 2007. « Human Error in Aircraft Maintenance ». In *Human Reliability and Error in Transportation Systems*, sous la dir. de Dhillon, B. S., p. 131-144. London: Springer London.
- Di Pasquale, V., S. Miranda, R. Iannone et S. Riemma. 2015. « A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA) ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 139, p. 17-32.
- Diagrams.net. 2021. « About diagrams.net ». < <https://www.diagrams.net/about> >. Consulté le 29 Juillet 2020.
- Dimitropoulos, N., T. Togias, N. Zacharaki, G. Michalos et S. Makris. 2021. « Seamless Human-Robot Collaborative Assembly Using Artificial Intelligence and Wearable Devices ». *Applied Sciences*, vol. 11, n° 12.
- Dinlersoz, E., et Z. Wolf. 2018. « Automation, Labor Share, and Productivity: Plant-Level Evidence from US Manufacturing ». In *Center for Economic Studies Research Papers*, sous la dir. de Goet, Christopher. p. 52. US Census Bureau.

- Djuric, A. M., R. J. Urbanic et J. L. Rickli. 2016. « A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems ».
- Domínguez, N. 2020. « Failed launch of Spanish satellite due to ‘human error,’ say officials ». *El País* (Madrid). < https://english.elpais.com/science_tech/2020-11-18/failed-launch-of-spanish-satellite-due-to-human-error-say-officials.html > Consulté le 15 janvier 2021.
- Dorrian, J., S. D. Baulk et D. Dawson. 2011. « Work hours, workload, sleep and fatigue in Australian Rail Industry employees ». *Applied Ergonomics*, vol. 42, n° 2, p. 202-209.
- Dorris, A. L., et B. L. Foote. 1978. « Inspection errors and statistical quality control: A survey ». *A I I E Transactions*, vol. 10, n° 2, p. 184-192.
- Doshi, J., et D. Desai. 2017. « Application of failure mode & effect analysis (FMEA) for continuous quality improvement-multiple case studies in automobile SMEs ». *International Journal for Quality Research*, vol. 11, n° 2, p. 345.
- Dostaler, I. 2013. « Competing in the global aerospace supply chain: The case of the Canadian aerospace industry ». *Operations Management Research*, vol. 6, n° 1, p. 32-43.
- Drath, R., et A. Horch. 2014. « Industrie 4.0: Hit or Hype? [Industry Forum] ». *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, n° 2, p. 56-58.
- Drury, C., et J. Fox. 1975. « The imperfect inspector ». *Human reliability in quality control*, p. 11-16.
- Easton, G. 2010. « Critical realism in case study research ». *Industrial Marketing Management*, vol. 39, n° 1, p. 118-128.
- Edinbrough, I., R. Balderas et S. Bose. 2005. « A vision and robot based on-line inspection monitoring system for electronic manufacturing ». *Computers in Industry*, vol. 56, n° 8, p. 986-996.
- Eklund, J. 1997. « Ergonomics, quality and continuous improvement conceptual and empirical relationships in an industrial context ». *Ergonomics*, vol. 40, n° 10, p. 982 - 1001.
- Eklund, J. A. E. 1999. « Ergonomics and Quality Management—Humans in Interaction With Technology, Work Environment, and Organization ». *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 5, n° 2, p. 143-160.

- Embrey, D. 1988. « Chapter 4 - Assessment and prediction of human reliability ». In *Health, Safety and Ergonomics*, sous la dir. de Nicholson, Andrew S., et John E. Ridd. p. 33-47. Butterworth-Heinemann.
- Embrey, D. 2014. « SHERPA: A Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach to modelling and assessing human reliability in complex tasks ». In *22nd European Safety and Reliability annual conference (ESREL 2013)*. (Amsterdam), sous la dir. de Steenbergen, R.D.J.M. , P.H.A.J.M. van Gelder, S. Miraglia et A.C.W.M. Vrouwenvelder, p. 311-316. CRC Press. In *Scopus*.
- Embrey, D. E. 1986. « SHERPA: A systematic human error reduction and prediction approach ». In *Proceedings of the International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems, April 21-24*. (Knoxville, TN), p. 184-193. American Nuclear Society.
- Erdoğan, O., et P. H. P. Yeow. 2011. « Proving external validity of ergonomics and quality relationship through review of real-world case studies ». *International Journal of Production Research*, vol. 49, n° 4, p. 949-962.
- Escalante, E. J. 1999. « Quality and productivity improvement: a study of variation and defects in manufacturing ». *Quality Engineering*, vol. 11, n° 3, p. 427-442.
- Eschen, H., T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch et T. Schüppstuhl. 2018. « Augmented and Virtual Reality for Inspection and Maintenance Processes in the Aviation Industry ». *Procedia Manufacturing*, vol. 19, p. 156-163.
- European Commission. 2017. « Germany: Industrie 4.0 ». < https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Industrie%204.0.pdf >. Consulté le 15 Décembre 2018.
- Fagerland, M. W. 2012. « t-tests, non-parametric tests, and large studies—a paradox of statistical practice? ». *BMC Medical Research Methodology*, vol. 12, n° 1, p. 78.
- Falck, A.-C., R. Örtengren et D. Högberg. 2010. « The impact of poor assembly ergonomics on product quality: A cost–benefit analysis in car manufacturing ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 20, n° 1, p. 24-41.
- Falck, A.-C., R. Örtengren et M. Rosenqvist. 2014. « Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2) ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, n° 3, p. 455-459.
- Falck, A.-C., R. Örtengren, M. Rosenqvist et R. Söderberg. 2016. « Criteria for Assessment of Basic Manual Assembly Complexity ». *Procedia CIRP*, vol. 44, p. 424-428.

- Falck, A.-C., et M. Rosenqvist. 2014. « A model for calculation of the costs of poor assembly ergonomics (part 1) ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, n° 1, p. 140-147.
- Falck, A.-C., M. Tarrar, S. Mattsson, L. Andersson, M. Rosenqvist et R. Söderberg. 2017. « Assessment of manual assembly complexity: a theoretical and empirical comparison of two methods ». *International Journal of Production Research*, vol. 55, n° 24, p. 7237-7250.
- Fan, J., et A. P. Smith. 2017. « The Impact of Workload and Fatigue on Performance ». In *Human Mental Workload: Models and Applications. H-WORKLOAD 2017. Communications in Computer and Information Science*, sous la dir. de Longo, Luca, et M. Chiara Leva. Vol. 726, p. 90-105. Coll. « Human Mental Workload: Models and Applications ». Cham: Springer.
- Fan, Y., Z. Li, J. Pei, H. Li et J. Sun. 2015. « Applying systems thinking approach to accident analysis in China: Case study of “7.23” Yong-Tai-Wen High-Speed train accident ». *Safety Science*, vol. 76, p. 190-201.
- Ferguson, S. A., G. M. Paech, J. Dorrian, G. D. Roach et S. M. Jay. 2011. « Performance on a simple response time task: Is sleep or work more important for miners? ». *Applied Ergonomics*, vol. 42, n° 2, p. 210-213.
- Fetters, M. D., et J. F. Molina-Azorin. 2016. « The Journal of Mixed Methods Research Starts a New Decade: Principles for Bringing in the New and Divesting of the Old Language of the Field ». *Journal of Mixed Methods Research*, vol. 11, n° 1, p. 3-10.
- Flick, U. 2018. *Doing Triangulation and Mixed Methods*. London, UK: SAGE Publications Ltd. < <https://methods.sagepub.com/book/doing-triangulation-and-mixed-methods> >. Consulté le 11 Décembre 2020.
- Folkard, S., et J. Barton. 1993. « Does the ‘forbidden zone’ for sleep onset influence morning shift sleep duration? ». *Ergonomics*, vol. 36, n° 1-3, p. 85-91.
- Folkard, S., K. A. Robertson et M. B. Spencer. 2007. « A Fatigue/Risk Index to assess work schedules ». *Somnologie - Schlafforschung und Schlafmedizin*, vol. 11, n° 3, p. 177-185.
- Fonseca, L., V. Lima et M. Silva. 2015. « Utilization of quality tools: does sector and size matter? ». *International Journal for Quality Research (IJQR)*, vol. 9, p. 605-620.

- Frizelle, G., et E. Woodcock. 1995a. « Measuring complexity as an aid to developing operational strategy ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 15, n° 5, p. 26-39.
- Frizelle, G., et E. Woodcock. 1995b. « Measuring complexity as an aid to developing operational strategy ». *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 15, n° 5, p. 26-39.
- Fu, G., L. Zhou, J. Wang et M. Shi. 2018. « Analysis of an explosion accident at Dangyang Power Plant in Hubei, China: Causes and lessons learned ». *Safety Science*, vol. 102, p. 134-143.
- Gallegos-Nieto, E., H. I. Medellín-Castillo, G. González-Badillo et T. Lim. 2014. « Virtual Training of Assembly Tasks Using Virtual Reality Techniques and Haptic Systems ». n° 46445, p. V02BT02A063.
- Gates, D. 2019. « Boeing tanker jets grounded due to tools and debris left during manufacturing ». *The Seattle Times*. < <https://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/boeing-tanker-jets-grounded-due-to-tools-and-debris-left-during-manufacturing/> > . Consulté le 28 février 2020.
- Gates, E. 2016. « Making sense of the emerging conversation in evaluation about systems thinking and complexity science ». *Evaluation and Program Planning*, vol. 59, p. 62-73.
- Gawron, V. J. 2016. « Overview of Self-Reported Measures of Fatigue ». *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 26, n° 3-4, p. 120-131.
- Geng, J., S. Zhang et B. Yang. 2015. « A Publishing Method of Lightweight Three-Dimensional Assembly Instruction for Complex Products ». *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 15, n° 3, p. 031004.
- Glock, C. H., E. H. Grosse, T. Kim, W. P. Neumann et A. Sobhani. 2019. « An integrated cost and worker fatigue evaluation model of a packaging process ». *International Journal of Production Economics*, vol. 207, p. 107-124.
- Gomm, R., M. Hammersley et P. Foster. 2000. *Case study method: Key issues, key texts*. Sage.
- Goncalves Filho, A. P., G. T. Jun et P. Waterson. 2019. « Four studies, two methods, one accident – An examination of the reliability and validity of Accimap and STAMP for accident analysis ». *Safety Science*, vol. 113, p. 310-317.

- Goode, N., G. J. M. Read, M. R. H. van Mulken, A. Clacy et P. M. Salmon. 2016. « Designing System Reforms: Using a Systems Approach to Translate Incident Analyses into Prevention Strategies ». *Frontiers in Psychology*, vol. 7, n° 1974.
- Goode, N., P. M. Salmon, M. G. Lenné et C. F. Finch. 2018. *Translating systems thinking into practice: a guide to developing incident reporting systems*. CRC Press.
- Goode, N., P. M. Salmon, N. Z. Taylor, M. G. Lenné et C. F. Finch. 2017. « Developing a contributing factor classification scheme for Rasmussen's AcciMap: Reliability and validity evaluation ». *Applied Ergonomics*, vol. 64, p. 14-26.
- Gore, B. F. 2018. « Chapter 3 - Workload and fatigue ». In *Space Safety and Human Performance*, sous la dir. de Sgobba, Tommaso, Barbara Kanki, Jean-François Clervoy et Gro Mjeldheim Sandal. p. 53-85. Butterworth-Heinemann.
- Górny, A. 2017. « The use of quality tools in risk management ». In *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene (SHO 2017)*. (Guimarães, Portugal, April 10-11).
- Grayson, G., et G. Maycock. 1987. « FROM PRONENESS TO LIABILITY --ROAD USER BEHAVIOR. THEORY AND RESEARCH ». In *2nd International Conference on Road Safety*. (Groningen, Netherlands). Van Ggorcum & Comp BV.
- Greenwood, M., et H. M. Woods. 1919. *The incidence of industrial accidents upon individuals, with special reference to multiple accidents*. London: Industrial Fatigue Research Board.
- GTAI. 2018. « Industrie 4.0 – What is it? ». <https://www.gtai.de/en/invest/industries/industrial-production/industrie-4-0/industrie-4-0-and-germany-162660> >. Consulté le 15 Novembre 2018.
- Gupta, S., et S. K. Jain. 2013. « A literature review of lean manufacturing ». *International Journal of Management Science and Engineering Management*, vol. 8, n° 4, p. 241-249.
- Hacker, W. 1978. *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie: psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. H. Huber.
- Hagan, R., D. Lichtner et C. Senesac. 2009. « Three-dimensional model based manufacturing work instructions ». In *65th Annual Forum- American Helicopter Society*. (TX, United States, May 27-29).

- Haines, S. 2010. « Systems Thinking Research Rediscovered: Ludwig von Bertalanffy and the Society for General System's Research's Relevance in the 21st Century ». *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the ISSS - 2010, Waterloo, Canada*, vol. 54, n° 1.
- Hancock, P. A., et J. L. Szalma. 2004. « On the relevance of qualitative methods for ergonomics ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 5, n° 6, p. 499-506.
- Hart, S. G. 2006. « NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 50, n° 9, p. 904-908.
- Hart, S. G., et L. E. Staveland. 1988. « Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research ». In *Human Mental Workload*, sous la dir. de Hancock, P.A. , et N. Meshkati. p. 5–39. Amsterdam: North Holland Press.
- Heale, R., et A. Twycross. 2018. « What is a case study? ». *Evidence Based Nursing*, vol. 21, n° 1, p. 7.
- Hempel, J., et S. Glemser. 2017. *Industry 4.0 - Starting the next industrial revolution in Germany*. < <https://hub.kpmg.de/industry-4-0-starting-the-next-industrial-revolution-in-germany> > Consulté le 15 Novembre 2018.
- Henke, J. 2015. *Eine Methodik zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage komplexer Systeme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 150 p.
- Hermann, M., T. Pentek et B. Otto. 2016. « Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios ». In *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*. (5-8 Jan. 2016), p. 3928-3937.
- Hernandez Arellano, J. L., J. A. Castillo Martínez, J. N. Serratos Pérez et J. L. García Alcaraz. 2015. « Relationship between Workload and Fatigue among Mexican Assembly Operators ». *International Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, vol. 3, n° 6, p. 1.
- Hignett, S., et J. R. Wilson. 2004. « The role for qualitative methodology in ergonomics: a case study to explore theoretical issues ». *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 5, n° 6, p. 473-493.
- Hillmann, M., S. Stühler, A. Schloske, D. Geisinger et E. Westkämper. 2014. « Improving Small-quantity Assembly Lines for Complex Industrial Products by Adapting the Failure Process Matrix (FPM): A Case Study ». *Procedia CIRP*, vol. 17, p. 236-241.
- Hodkinson, P., et H. Hodkinson. 2001. « The strengths and limitations of case study research ». In *learning and skills development agency conference at Cambridge*. Vol. 1, p. 5-7.

- Hollnagel, E. 1993. « The phenotype of erroneous actions ». *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 39, n° 1, p. 1-32.
- Hollnagel, E. 2000. « Looking for errors of omission and commission or The Hunting of the Snark revisited ». *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 68, n° 2, p. 135-145.
- Hollnagel, E. 2005. « Human reliability assessment in context ». *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 37, n° 2, p. 159-166.
- Hollnagel, E. 2006. « Accident Analysis and Human Error ». In *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, Second Edition - 3 Volume Set*. CRC Press. < <http://dx.doi.org/10.1201/9780849375477.pt8> >. Consulté le 28 Juin 2019.
- Hollnagel, E. 2012. *FRAM, the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems*. Ashgate Publishing, Ltd.
- Hollnagel, E. 2020. *Synesis: The Unification of Productivity, Quality, Safety and Reliability*. Routledge.
- Holroyd, J., et J. Bell. 2009. *Review of human reliability assessment methods*. Health and Safety Laboratory. < <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr679.htm> > Consulté le 15 Mars 2019.
- Honn, K. A., J. M. Hinson, P. Whitney et H. P. A. Van Dongen. 2019a. « Cognitive flexibility: A distinct element of performance impairment due to sleep deprivation ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 126, p. 191-197.
- Honn, K. A., B. C. Satterfield, P. McCauley, J. L. Caldwell et H. P. A. Van Dongen. 2016. « Fatiguing effect of multiple take-offs and landings in regional airline operations ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 86, p. 199-208.
- Honn, K. A., H. P. A. Van Dongen et D. Dawson. 2019b. « Working Time Society consensus statements: Prescriptive rule sets and risk management-based approaches for the management of fatigue-related risk in working time arrangements ». *Industrial Health*, vol. 57, n° 2, p. 264-280.
- Hossain, N. U. I., V. L. Dayarathna, M. Nagahi et R. Jaradat. 2020. « Systems thinking: A review and bibliometric analysis ». *Systems*, vol. 8, n° 3, p. 23.
- Hoyek, N., C. Collet, F. Di Rienzo, M. De Almeida et A. Guillot. 2014. « Effectiveness of three-dimensional digital animation in teaching human anatomy in an authentic classroom context ». *Anatomical Sciences Education*, vol. 7, n° 6, p. 430-437.

- Høyland, A., et M. Rausand. 2009. *System reliability theory: models and statistical methods*, 420. John Wiley & Sons.
- HSE. 2018. « Understanding human failure ». Health and Safety Executive, United Kingdom. < <http://www.hse.gov.uk/construction/lwit/assets/downloads/human-failure.pdf> >. Consulté le 10 Janvier 2019.
- Hulme, A., N. A. Stanton, G. H. Walker, P. Waterson et P. M. Salmon. 2019. « What do applications of systems thinking accident analysis methods tell us about accident causation? A systematic review of applications between 1990 and 2018 ». *Safety Science*, vol. 117, p. 164-183.
- Hulme, A., N. A. Stanton, G. H. Walker, P. Waterson et P. M. Salmon. 2021. « Are accident analysis methods fit for purpose? Testing the criterion-referenced concurrent validity of AcciMap, STAMP-CAST and AcciNet ». *Safety Science*, vol. 144, p. 105454.
- IAEA. 1989. *Human error classification and data collection*. IAEA-TECDOC-538: The International Atomic Energy Agency, 167 p. < https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_538_web.pdf > Consulté le 10 Février 2019.
- ICAO. 1993. *Investigation of Human Factors in Accidents and Incidents*. Coll. « HUMAN FACTORS DIGEST No. 7 ». Montreal, Canada: The International Civil Aviation Organization
- ICAO. 2019. « Manual for the Oversight of Fatigue Management Approaches ». Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 225 p. < <https://www.icao.int/safety/airnavigation/OPS/CabinSafety/Pages/Cabin-Crew-Fatigue-Management.aspx> >. Consulté le 25 Janvier 2020.
- IEEE. 2018. « IEEE Guide for Incorporating Human Reliability Analysis into Probabilistic Risk Assessments for Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities ». *IEEE Std 1082-2017 (Revision of IEEE Std 1082-1997)*, p. 1-34.
- Igene, O. O. 2020. « Development and assessment of the reliability and validity of a proposed Medi-Socio AcciMap Taxonomy Approach for investigating IT-related incidents in Healthcare ». University of Glasgow, 384 p.
- Igene, O. O., et C. Johnson. 2020. « To Computerised Provider Order Entry system: A comparison of ECF, HFACS, STAMP and AcciMap approaches ». *Health Informatics Journal*, vol. 26, n° 2, p. 1017-1042.

- Ingre, M., G. Kecklund, T. Åkerstedt, M. Söderström et L. Kecklund. 2008. « Sleep Length as a Function of Morning Shift-Start Time in Irregular Shift Schedules for Train Drivers: Self-Rated Health and Individual Differences ». *Chronobiology International*, vol. 25, n° 2-3, p. 349-358.
- Isherwood, P., et P. Waterson. 2021. « To err is system; a comparison of methodologies for the investigation of adverse outcomes in healthcare ». *Journal of Patient Safety and Risk Management*, vol. 26, n° 2, p. 64-73.
- ISO. 2016. *ISO 6385 Ergonomics principles in the design of work system*. Geneva, Switzerland: Organization for Standardization.
- ISO. 2017. *ISO 10075-1: Principes ergonomiques concernant la charge de travail mentale — Partie 1: Questions et concepts généraux, termes et définitions*. Genève, Suisse.
- Jebaraj, D., R. A. Tyrrell et A. K. Gramopadhye. 1999. « Industrial inspection performance depends on both viewing distance and oculomotor characteristics ». *Applied Ergonomics*, vol. 30, n° 3, p. 223-228.
- Jeunet, J., et M. Bou Orm. 2020. « Optimizing temporary work and overtime in the Time Cost Quality Trade-off Problem ». *European Journal of Operational Research*, vol. 284, n° 2, p. 743-761.
- Johnson, C. W. 2014. « Economic recession and a crisis of regulation in safety-critical industries ». *Safety Science*, vol. 68, p. 153-160.
- Johnson, R. B., A. J. Onwuegbuzie et L. A. Turner. 2007. « Toward a Definition of Mixed Methods Research ». *Journal of Mixed Methods Research*, vol. 1, n° 2, p. 112-133.
- Judt, D., C. Lawson et H. Lockett. 2020. « Experimental investigation into aircraft system manual assembly performance under varying structural component orientations ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 234, n° 4, p. 840-855.
- Kaplan, R. S., et W. J. Bruns. 1987. *Accounting & Management: Field Study Perspectives*. Harvard Business School Press, 374 p.
- Karran, A. J., T. Demazure, P.-M. Leger, E. Labonte-LeMoyne, S. Senecal, M. Fredette et G. Babin. 2019. « Toward a Hybrid Passive BCI for the Modulation of Sustained Attention Using EEG and fNIRS ». *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 13, p. 393.

- Kee, D., G. T. Jun, P. Waterson et R. Haslam. 2017. « A systemic analysis of South Korea Sewol ferry accident – Striking a balance between learning and accountability ». *Applied Ergonomics*, vol. 59, p. 504-516.
- Kent, R. 2016. « Chapter 8 - Design quality management ». In *Quality Management in Plastics Processing*, sous la dir. de Kent, Robin. p. 227-262. Elsevier.
- Kern, C., et R. Refflinghaus. 2013. « Cross-disciplinary method for predicting and reducing human error probabilities in manual assembly operations ». *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 24, n° 7-8, p. 847-858.
- Kern, C., et R. Refflinghaus. 2015a. « Assembly-specific database for predicting human reliability in assembly operations ». *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 26, n° 9-10, p. 1056-1070.
- Kern, C., et R. Refflinghaus. 2015b. « Expert System for Evaluating Human Reliability in Manual Assembly Operations ». In *18th Toulon-Verona International Conference*. (Palermo, August 31-September 1), p. 261-276. University of Palermo.
- Kirwan, B. 1992. « Human error identification in human reliability assessment. Part 1: Overview of approaches ». *Applied Ergonomics*, vol. 23, n° 5, p. 299-318.
- Kirwan, B. 1994. *A Guide To Practical Human Reliability Assessment*. CRC Press, 606 p.
- Kirwan, B. 1995. « Human reliability assessment ». In *Evaluation of human work : a practical ergonomics methodology*, sous la dir. de Corlett, John R. Wilson, et E. Nigel. p. 921-968. London : Bristol, PA: Taylor & Francis.
- Kmenta, S., B. Cheldelin et K. Ishii. 2003. « Assembly FMEA: A Simplified Method for Identifying Assembly Errors ». In *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. Design Engineering, Volumes 1 and 2, p. 315-323. < <https://doi.org/10.1115/IMECE2003-41595> >. Consulté le 6 Août 2020.
- Knauth, P., K. Landau, C. Dröge, M. Schwitteck, M. Widynski et J. Rutenfranz. 1980. « Duration of sleep depending on the type of shift work ». *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 46, n° 2, p. 167-177.
- Koenig, G. 2009. « Realistic evaluation and case studies: stretching the potential ». *Evaluation*, vol. 15, n° 1, p. 9-30.

- Kohl, H., R. Orth, O. Riebartsch, M. Galeitzke et J.-P. Cap. 2015. « Support of Innovation Networks in Manufacturing Industries Through Identification of Sustainable Collaboration Potential and Best-Practice Transfer ». *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 185-189.
- Kolbeinsson, A., J. Lindblom et P. Thorvald. 2017. « Missing mediated interruptions in manual assembly: Critical aspects of breakpoint selection ». *Applied Ergonomics*, vol. 61, p. 90-101.
- Kolus, A., R. Wells et P. Neumann. 2018. « Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework ». *Applied Ergonomics*, vol. 73, p. 55-89.
- Kolus, A., M. Yung, W. Neumann et R. P. Wells. 2014. « Fatigue as an intermediary in production errors ». In *Industrial and Systems Engineering Research Conference (ISERC)*. (Montreal, May 31 - June 3, 2014).
- Kong, F. 2019. « Development of metric method and framework model of integrated complexity evaluations of production process for ergonomics workstations ». *International Journal of Production Research*, vol. 57, n° 8, p. 2429-2445.
- Konig, A., P. Windirsch, M. Gasteier et M. Glesner. 1995. « Visual inspection in industrial manufacturing ». *IEEE Micro*, vol. 15, n° 3, p. 26-31.
- Krugh, M., K. Antani, L. Mears et J. Schulte. 2016. « Prediction of Defect Propensity for the Manual Assembly of Automotive Electrical Connectors ». *Procedia Manufacturing*, vol. 5, p. 144-157.
- Kuzgunkaya, O., et H. A. ElMaraghy. 2006. « Assessing the structural complexity of manufacturing systems configurations ». *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 18, n° 2, p. 145-171.
- Labus, N., et B. Gajšek. 2018. « Use of ergonomic principles in manual order picking systems ». vol. 9, n° 1, p. 11.
- Lai, Z.-H., W. Tao, M. C. Leu et Z. Yin. 2020. « Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing ». *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 55, p. 69-81.
- Lamond, N., et D. Dawson. 1999. « Quantifying the performance impairment associated with fatigue ». *Journal of Sleep Research*, vol. 8, n° 4, p. 255-262.

- Landau, K., R. Brauchler et W. Rohmert. 2003. « The AET method of job evaluation ». In *Occupational Ergonomics Principles of Work Design*, sous la dir. de Karwowski, W., et W. S. Marras. p. 20. CRC Press.
- Landoni, M., et d. ogilvie. 2019. « Convergence of innovation policies in the European aerospace industry (1960–2000) ». *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 147, p. 174-184.
- Lane, B. R., G. J. M. Read, L. Cook et P. M. Salmon. 2020a. « A systems thinking perspective on the barriers to treatment access for people with eating disorders ». *International Journal of Eating Disorders*, vol. 53, n° 2, p. 174-179.
- Lane, B. R., P. M. Salmon, D. Desmond, A. Cherney, A. Carley, A. Hulme et N. A. Stanton. 2020b. « Out of control? Using STAMP to model the control and feedback mechanisms surrounding identity crime in darknet marketplaces ». *Applied Ergonomics*, vol. 89, p. 103223.
- Larouzée, J., et F. Guarnieri. 2015. *Fonds bibliographique Sir James Reason - Une vie dans l'erreur*. CRC_WP_2015_25: MINES ParisTech, 16 pages p.
- Larouzée, J., F. Guarnieri et D. Besnard. 2014. *Le modèle de l'erreur humaine de James Reason*. CRC_WP_2014_24: MINES ParisTech, 44 pages p.
- Larouzee, J., et J.-C. le coze. 2020. « Good and bad reasons: The Swiss cheese model and its critics ». *Safety Science*, vol. 126, p. 104660.
- Latorella, K. A., et P. V. Prabhu. 2000. « A review of human error in aviation maintenance and inspection ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 26, n° 2, p. 133-161.
- Lawton, R., et D. Parker. 1998. « Individual Differences in Accident Liability: A Review and Integrative Approach ». *Human Factors*, vol. 40, n° 4, p. 655-671.
- LeFloch, T., S. Nadeau, F. Morency et K. Landau. 2018. « Deicing Aircrafts in Open Baskets: Study of the Effects of Postures and Activities on Heart Rate Variability ». In *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Frankfurt, Germany). GfA.
- Leidenkrantz, A., et E. Westbrandt. 2019. « Implementation of machine vision on a collaborative robot ». Bachelor Degree Project. University of Skovde, 60 p.
- Leplat, J., et J.-C. Sperandio. 1967. « La mesure de la charge de travail par la technique de la tâche ajoutée ». *L'Année psychologique*, vol. 67, n° 1, p. 255-277.

- Lerman, S. E., E. Eskin, D. J. Flower, E. C. George, B. Gerson, N. Hartenbaum, S. R. Hursh, M. Moore-Ede et A. P. T. F. o. F. R. Management.: 2012. « Fatigue Risk Management in the Workplace ». *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 54, n° 2, p. 231-258 10.1097/JOM.0b013e318247a3b0.
- Leveson, N. G. 2004. « A new accident model for engineering safer systems ». *Safety Science*, vol. 42, n° 4, p. 237-270.
- Leveson, N. G. 2011. *Engineering a safer world: Systems thinking applied to safety*. Cambridge, U.S: The MIT Press, 534 p.
- Leveson, N. G. 2017. « Rasmussen's legacy: A paradigm change in engineering for safety ». *Applied Ergonomics*, vol. 59, p. 581-591.
- Li, D., S. Mattsson, O. Salunkhe, Å. Fast-Berglund, A. Skoogh et J. Broberg. 2018. « Effects of Information Content in Work Instructions for Operator Performance ». *Procedia Manufacturing*, vol. 25, p. 628-635.
- Lotter, B., et H.-P. Wiendahl. 2009. « Changeable and Reconfigurable Assembly Systems ». In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, sous la dir. de ElMaraghy, Hoda A. Lotter2009. p. 127-142. London: Springer London.
- Lyons, M. 2009. « Towards a framework to select techniques for error prediction: Supporting novice users in the healthcare sector ». *Applied Ergonomics*, vol. 40, n° 3, p. 379-395.
- Maincent, A., R. Martin et D. Van Box Som. 2005. « Évaluation de la charge de travail d'opérateurs d'un système complexe à risques : Le cas du pilotage d'une centrale nucléaire ». *Les Cahiers de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines*, n° spécial, p. 471.
- Makowiec-Dabrowska, T., et A. Bortkiewicz. 1990. « The relationship between psychic workload and cardiovascular response in industrial men managers ». *Pol J Occup Med*, vol. 3, n° 3, p. 323-31.
- Makrini, I. E., K. Merckaert, D. Lefeber et B. Vanderborght. 2017. « Design of a collaborative architecture for human-robot assembly tasks ». In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. (24-28 Sept. 2017), p. 1624-1629.
- Mansikka, H., K. Virtanen et D. Harris. 2019. « Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper–Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks ». *Ergonomics*, vol. 62, n° 2, p. 246-254.

- Mantravadi, S., et C. Møller. 2019. « An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0? ». *Procedia Manufacturing*, vol. 30, p. 588-595.
- Maruchek, A., N. Greis, C. Mena et L. Cai. 2011. « Product safety and security in the global supply chain: Issues, challenges and research opportunities ». *Journal of Operations Management*, vol. 29, n° 7, p. 707-720.
- Veillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.
- Mattsson, S., Å. Fast-Berglund et D. Li. 2016. « Evaluation of Guidelines for Assembly Instructions ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 12, p. 209-214.
- Mattsson, S., Å. Fast-Berglund, D. Li et P. Thorvald. 2018a. « Forming a cognitive automation strategy for Operator 4.0 in complex assembly ». *Computers & Industrial Engineering*.
- Mattsson, S., D. Li et Å. Fast-Berglund. 2018b. « Application of design principles for assembly instructions – evaluation of practitioner use ». *Procedia CIRP*, vol. 76, p. 42-47.
- May, J., et P. Kline. 1988. « Problems in using an adjective checklist to measure fatigue ». *Personality and Individual Differences*, vol. 9, n° 4, p. 831-832.
- Mayrhofer, W., P. Rupprecht et S. Schlund. 2019. « One-fits-all vs. tailor-made: user-centered workstations for field assembly with an application in aircraft parts manufacturing ». *Procedia Manufacturing*, vol. 39, p. 149-157.
- McNab, D., J. McKay, S. Shorrock, S. Luty et P. Bowie. 2020. « Development and application of ‘systems thinking’ principles for quality improvement ». *BMJ Open Quality*, vol. 9, n° 1, p. e000714.
- Medbo, L. 2003. « Assembly work execution and materials kit functionality in parallel flow assembly systems ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 31, n° 4, p. 263-281.
- Meister, M. 2014. « Resilience in socio-technical systems - A system-theoretical analysis of production using the example of a BMW AG engine (Translated from German) ». Munich, Germany, Technische Universität München, 167 p.
- Melanson, A., et S. Nadeau. 2019. « Resilience Engineering for Sustainable Prevention in the Manufacturing Sector: A Comparative Study of Two Methods of Risk Analysis ». *American Journal of Industrial and Business Management*, vol. 09, p. 267-281.

- Merrett, H. C., W. T. Chen et J. J. Horng. 2019. « A Systems Analysis Approach to Identifying Critical Success Factors in Drinking Water Source Protection Programs ». *Sustainability*, vol. 11, n° 9, p. 2606.
- Miller, J., et A. Narvaez. 1986. « A comparison of two subjective fatigue checklists ». In *10th Psychology in the DoD Symposium* (Colorado Springs, CO, 16-18 April), sous la dir. de Lee, George E., p. 514-518. United States Air Force Academy.
- Miller, J. C. 2008. « Fundamentals of Shiftwork Scheduling ». *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, vol. 16, n° 3, p. 13-17.
- Miqueo, A., M. Torralba et J. A. Yagüe-Fabra. 2020. « Lean Manual Assembly 4.0: A Systematic Review ». *Applied Sciences*, vol. 10, n° 23, p. 8555.
- Mocenco, D. 2015. « Supply chain features of the aerospace industry. particular case airbus and boeing ». *Scientific Bulletin-Economic Sciences*, vol. 14, n° 2, p. 17-25.
- Mofidi, A., et S. Nadeau. 2021. « FRAM and STAMP new avenue for risk analysis of manufacturing in the context of industry 4.0 ». In *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Bochum, Germany, Mar. 03-05). Vol. 67. GfA-Press.
- Montuori, A. 2011. « Social Psychology ». In *Encyclopedia of Creativity (Second Edition)*, sous la dir. de Runco, Mark A., et Steven R. Pritzker. p. 345-351. San Diego: Academic Press.
- Moreno, C. R. C., E. C. Marqueze, C. Sargent, K. P. Wright Jr, S. A. Ferguson et P. Tucker. 2019. « Working Time Society consensus statements: Evidence-based effects of shift work on physical and mental health ». *Industrial Health*, vol. 57, n° 2, p. 139-157.
- Morgan, D. L. 2007. « Paradigms Lost and Pragmatism Regained: Methodological Implications of Combining Qualitative and Quantitative Methods ». *Journal of Mixed Methods Research*, vol. 1, n° 1, p. 48-76.
- Morlock, F., N. Kreggenfeld, L. Louw, D. Kreimeier et B. Kuhlenkötter. 2017. « Teaching Methods-Time Measurement (MTM) for Workplace Design in Learning Factories ». *Procedia Manufacturing*, vol. 9, p. 369-375.
- Moroney, W. F. 1994. « Ethical Issues Related to the Use of Humans in Human Factors and Ergonomics ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 38, n° 6, p. 404-408.
- Moura, R., M. Beer, E. Patelli, J. Lewis et F. Knoll. 2016. « Learning from major accidents to improve system design ». *Safety Science*, vol. 84, p. 37-45.

- Mouras, F., et A. Badri. 2020. « Survey of the Risk Management Methods, Techniques and Software Used Most Frequently in Occupational Health and Safety ». *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 10, p. 149-160.
- Mukund Nilakantan, J., S. G. Ponnambalam et P. Nielsen. 2017. « Chapter 13 - Application of Particle Swarm Optimization to Solve Robotic Assembly Line Balancing Problems ». In *Handbook of Neural Computation*, sous la dir. de Samui, Pijush, Sanjiban Sekhar et Valentina E. Balas. p. 239-267. Academic Press.
- Mutlu, N. G., et S. Altuntas. 2019. « Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 72, p. 222-240.
- Nadeau, S., R. Bruder et L. A. Hof. 2021. « Using Smart Glasses in Assembly/disassembly Tasks: State of the Art ». *Travail et Santé*, vol. 37, n° 2, p. 2-6.
- Nadeau, S., L. A. Hof et K. Landau. 2022. « Les systèmes d'assistance numérique au service de la diversité. ». In *Congrès AQHSST*. (Sherbrooke, Canada., May). AQHSST.
- Nadeau, S., et K. Landau. 2018. « Utility, Advantages and Challenges of Digital Technologies in the Manufacturing Sector ». *Ergonomics International Journal*, vol. 2, n° 6, p. 1-15.
- Nadeau, S., et A. Mofidi. 2021. « Application of FRAM to Perform Risk Analysis of the Introduction of a Data Glove to Assembly Tasks ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 74, p. 102285.
- Naeini, A. M., et S. Nadeau. 2022. « Application of FRAM to perform Risk Analysis of the Introduction of a Data Glove to Assembly Tasks ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 74, p. 102285.
- Nagel, D. C. 1988. « 9 - Human Error in Aviation Operations ». In *Human Factors in Aviation*. p. 263-303. San Diego: Academic Press.
- Nahavandi, S. 2019. « Industry 5.0—A Human-Centric Solution ». *Sustainability*, vol. 11, n° 16.
- Naranjo, J. E., D. G. Sanchez, A. Robalino-Lopez, P. Robalino-Lopez, A. Alarcon-Ortiz et M. V. Garcia. 2020. « A Scoping Review on Virtual Reality-Based Industrial Training ». *Applied Sciences*, vol. 10, n° 22, p. 8224.

- Neumann, W. P., A. Kolus et R. W. Wells. 2016. « Human Factors in Production System Design and Quality Performance – A Systematic Review ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, n° 12, p. 1721-1724.
- Neville, K. J., R. U. Bisson, J. French, P. A. Boll et W. F. Storm. 1994. « Subjective Fatigue of C-141 Aircrews during Operation Desert Storm ». *Human Factors*, vol. 36, n° 2, p. 339-349.
- Noor, K. b. 2008. « Case Study: A Strategic Research Methodology ». *American Journal of Applied Sciences*, vol. 5.
- Norman, G. 2010. « Likert scales, levels of measurement and the “laws” of statistics ». *Advances in Health Sciences Education*, vol. 15, n° 5, p. 625-632.
- Noy, Y. I., W. J. Horrey, S. M. Popkin, S. Folkard, H. D. Howarth et T. K. Courtney. 2011. « Future directions in fatigue and safety research ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, n° 2, p. 495-497.
- Noyes, J. M., et D. P. J. Bruneau. 2007. « A self-analysis of the NASA-TLX workload measure ». *Ergonomics*, vol. 50, n° 4, p. 514-519.
- Ojer, M., H. Alvarez, I. Serrano, F. A. Saiz, I. Barandiaran, D. Aguinaga, L. Querejeta et D. Alejandro. 2020. « Projection-Based Augmented Reality Assistance for Manual Electronic Component Assembly Processes ». *Applied Sciences*, vol. 10, n° 3, p. 796.
- Oliveira, B. G., L. B. Liboni, L. O. Cezarino, N. O. Stefanelli et I. K. Miura. 2020. « Industry 4.0 in systems thinking: From a narrow to a broad spectrum ». *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 37, n° 4, p. 593-606.
- Oster, C. V., J. S. Strong et K. Zorn. 2010. « Why Airplanes Crash: Causes of Accidents Worldwide ». In *51st Annual Transportation Research Forum, Arlington, Virginia, March 11-13, 2010*. Transportation Research Forum.
- Oxstrand, J., K. Bladh et S. Collier. 2010. « Qualitative Analysis Makes Simple HRA Methods a Competitive Alternative ». In *10th International Probabilistic Safety Assessment & Management Conference, June 7-11. (Seattle, Washington)*. Vol. 2.
- P&WC. 2020. « PT6 turboprop engine makes general aviation history: 50,000th engine rolls off the Pratt & Whitney production line ». *Pratt & Whitney Canada News and Events*. < <https://www.pwc.ca/en/company/news-and-events/news-details/pt6-turboprop-engine-makes-general-aviation-h?id=123414> >. Consulté le 6 Janvier 2022.

- Pan, X., Y. Lin et C. He. 2016. « A Review of Cognitive Models in Human Reliability Analysis ». *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 33, n° 7, p. 1299-1316.
- Park, Y. S., L. Konge et A. R. Artino. 2020. « The Positivism Paradigm of Research ». *Academic Medicine*, vol. 95, n° 5, p. 690-694.
- Pasquale, V. D., S. Miranda, W. P. Neumann et A. Setayesh. 2018. « Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review ». *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, n° 11, p. 675-680.
- Patel, S. 2016. *The global quality management system: improvement through systems thinking*. CRC Press.
- Paz Barroso, M., et J. R. Wilson. 1999. « HEDOMS—Human Error and Disturbance Occurrence in Manufacturing Systems: Toward the development of an analytical framework ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 9, n° 1, p. 87-104.
- PCIAOH. 1981. « Night and Shift Work: Biological and Social Aspects. ». In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Night and Shift Work: Scientific Committee on Shift Work of the Permanent Commission and International Association on Occupational Health (PCIAOH)* (Rouen), sous la dir. de Reinberg, Alain, N. Vieux et P. Andlauer, p. 509. Pergamon Press.
- Peruzzini, M., F. Grandi et M. Pellicciari. 2018. « Exploring the potential of Operator 4.0 interface and monitoring ». *Computers & Industrial Engineering*.
- Petzoldt, C., D. Keiser, T. Beinke et M. Freitag. 2020. « Functionalities and Implementation of Future Informational Assistance Systems for Manual Assembly ». In *Subject-Oriented Business Process Management. The Digital Workplace – Nucleus of Transformation*. (Cham, 2020/), sous la dir. de Freitag, Michael, Aseem Kinra, Herbert Kotzab, Hans-Jörg Kreowski et Klaus-Dieter Thoben, p. 88-109. Springer International Publishing.
- Phillips, S. 2015. *Fatigue in sport and exercise*. Routledge.
- Powell, D. M. C., M. B. Spencer et K. J. Petrie. 2011. « Automated Collection of Fatigue Ratings at the Top of Descent: A Practical Commercial Airline Tool ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, vol. 82, n° 11, p. 1037-1041.

- Puspawardhani, E. H., M. R. Suryoputro, A. D. Sari, R. D. Kurnia et H. Purnomo. 2016. « Mental Workload Analysis Using NASA-TLX Method Between Various Level of Work in Plastic Injection Division of Manufacturing Company ». In *Advances in Safety Management and Human Factors*, sous la dir. de Arezes, Pedro. Vol. 491, p. 311-319. Cham: Springer International Publishing.
- Raeisi, A., M. A. Rarani et F. Soltani. 2019. « Challenges of patient handover process in healthcare services: A systematic review ». *Journal of education and health promotion*, vol. 8, p. 173-173.
- Rashid, H. 2010. « Human Factors Effects in Helicopter Maintenance: Proactive Monitoring and Controlling Techniques ». Cranfield University, 320 p.
- Rasmussen, J. 1982. « Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations ». *Journal of Occupational Accidents*, vol. 4, n° 2, p. 311-333.
- Rasmussen, J. 1983. « Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, n° 3, p. 257-266.
- Rasmussen, J. 1990. « Human error and the problem of causality in analysis of accidents ». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, vol. 327, n° 1241, p. 449-462.
- Rasmussen, J. 1997. « Risk management in a dynamic society: a modelling problem ». *Safety Science*, vol. 27, n° 2, p. 183-213.
- Rasmussen, J., et I. Svedung. 2000. *Proactive risk management in a dynamic society*, 1st. Karlstad, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 160 p.
- Ray, S. 2017. « A Beginner's Guide to MS Visio for AcciMap ». < <https://systemsthinkinglab.files.wordpress.com/2017/09/beginners-guide-to-visio-for-accimap.pdf> >. Consulté le 18 Septembre 2021
- Read, G. J. M., S. Shorrock, G. H. Walker et P. M. Salmon. 2021. « State of science: evolving perspectives on 'human error' ». *Ergonomics*, p. 1-24.
- Reason, J. 1990a. « The contribution of latent human failures to the breakdown of complex systems ». *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, vol. 327, n° 1241, p. 475-84.
- Reason, J. 1990b. *Human error*. New York, USA: Cambridge University Press, 320 p.

- Reason, J. (272). 1997. *Managing the risks of organizational accidents*. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Company.
- Reason, J. 2000. « Human error: models and management ». *BMJ : British Medical Journal*, vol. 320, n° 7237, p. 768-770.
- Reason, J., E. Hollnagel et J. Paries (35). 2006. *Revisiting the Swiss cheese model of accidents*. Brétigny-sur-Orge, France: EUROCONTROL Experimental Centre.
- Reason, P. 2003. « Pragmatist Philosophy and Action Research: Readings and Conversation with Richard Rorty ». *Action Research*, vol. 1, n° 1, p. 103-123.
- Redeker, N. S., C. C. Caruso, S. D. Hashmi, J. M. Mullington, M. Grandner et T. I. Morgenthaler. 2019. « Workplace Interventions to Promote Sleep Health and an Alert, Healthy Workforce ». *Journal of clinical sleep medicine : JCSM : official publication of the American Academy of Sleep Medicine*, vol. 15, n° 4, p. 649-657.
- Refflinghaus, R., et C. Kern. 2018. « On the track of human errors - Procedure and results of an innovative assembly planning method ». *Procedia Manufacturing*, vol. 21, p. 157-164.
- Richards, B. D. 2018. « Error probabilities and relationships in assembly and maintenance of aircraft engines ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 62, n° 1, p. 1599-1603.
- Richardson, M., G. Jones et M. Torrance. 2004. « Identifying the task variables that influence perceived object assembly complexity ». *Ergonomics*, vol. 47, n° 9, p. 945-964.
- Richardson, M., G. Jones, M. Torrance et T. Baguley. 2006. « Identifying the Task Variables That Predict Object Assembly Difficulty ». *Human Factors*, vol. 48, n° 3, p. 511-525.
- Riege, A. M. 2003. « Validity and reliability tests in case study research: a literature review with “hands-on” applications for each research phase ». *Qualitative Market Research: An International Journal*, vol. 6, n° 2, p. 75-86.
- Riffenburgh, R. H. 2012. « Chapter 15 - Managing Results of Analysis ». In *Statistics in Medicine (Third Edition)*, sous la dir. de Riffenburgh, R. H., p. 325-343. San Diego: Academic Press.
- Rodriguez-Toro, C., G. Jared et K. Swift. 2004. « Product-development complexity metrics: A framework for proactive-DFA implementation ». In *International Design Conference*. (May 18 - 21, 2004).

- Rodríguez, Y., et S. Hignett. 2021. « Integration of human factors/ergonomics in healthcare systems: A giant leap in safety as a key strategy during Covid-19 ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. n/a, n° n/a, p. 1-7.
- Rohmert, W. 1986. « Ergonomics: concept of work, stress and strain ». *Applied Psychology*, vol. 35, n° 2, p. 159-180.
- Rohmert, W., et W. Laurig. 1975. « Evaluation of work requiring physical effort ». Luxembourg: EU Commission - Working Document EUR 5221 e, 172 p. < <http://aei.pitt.edu/41719/> >. Consulté le 7 Février 2020.
- Romero, D., S. Mattsson, Å. Fast-Berglund, T. Wuest, D. Gorecky et J. Stahre. 2018. « Digitalizing Occupational Health, Safety and Productivity for the Operator 4.0 ». In *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0*. (Cham, 2018//), sous la dir. de Moon, Ilkyeong, Gyu M. Lee, Jinwoo Park, Dimitris Kiritsis et Gregor von Cieminski, p. 473-481. Springer International Publishing.
- Romero, D., J. Stahre, L. Larsson et A. Rönnbäck. 2021. *Building Manufacturing Resilience through Production Innovation*.
- Romero, D., J. Stahre, T. Wuest, O. Noran, P. Bernus, F.-B. Å. Fasth et D. Gorecky. 2016. « Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies ». In *CIE46 Proceedings*. (Tianjin / China).
- Rosenqvist, Mikael, Falck, C. Ann, L. Lars, Söderberg et Rikard. 2014. « Geometrical Robustness Analysis Considering Manual Assembly Complexity ». *Procedia CIRP*, vol. 23, p. 98-103.
- Rouse, W. B., et S. H. Rouse. 1983. « Analysis and classification of human error ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, n° 4, p. 539-549.
- Rubio, S., E. Díaz, J. Martín et J. M. Puente. 2004. « Evaluation of Subjective Mental Workload: A Comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile Methods ». *Applied Psychology*, vol. 53, n° 1, p. 61-86.
- Sagah Zadeh, R., M. Shepley, H. Sadatsafavi, A. H. Owora et A. C. Krieger. 2017. « Alert Workplace From Healthcare Workers' Perspective: Behavioral and Environmental Strategies to Improve Vigilance and Alertness in Healthcare Settings ». *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, vol. 11, n° 2, p. 72-88.
- Said, S., M. Gozdzik, T. R. Roche, J. Braun, J. Rössler, A. Kaserer, D. R. Spahn, C. B. Nöthiger et D. W. Tscholl. 2020. « Validation of the Raw National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) Questionnaire to Assess Perceived

- Workload in Patient Monitoring Tasks: Pooled Analysis Study Using Mixed Models ». *J Med Internet Res*, vol. 22, n° 9, p. e19472.
- Salmon, P. M., M. Cornelissen et M. J. Trotter. 2012. « Systems-based accident analysis methods: A comparison of Accimap, HFACS, and STAMP ». *Safety Science*, vol. 50, n° 4, p. 1158-1170.
- Samn, S. W., et L. P. Perelli. 1982. *Estimating Aircrew Fatigue: A Technique with Application to Airlift Operations. Technical Report SAM-TR-82-21*. Brooks Airforce Base, Texas: USAF School of Aerospace Medicine, 29 p.
- Sartal, A., R. Bellas, A. M. Mejías et A. García-Collado. 2014. « The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review ». *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, n° 5, p. 1687814020925232.
- Sarter, D. D. W., D. Sidney, C. Richard, J. Leila, S. Nadine, D. Sidney, C. Richard, J. Leila et Nadine. 2010. *Behind Human Error*. London: CRC Press, 292 p.
- Schloske, A., et J. Henke. 2006. « Failure Process Matrix (FPM)—a new approach for the optimization of assembly lines ». In *Westkämper E. The 1st CIRP International Seminar on Assembly Systems, Stuttgart*. p. 257-260.
- Schvaneveldt, R. W., R. L. Gomez et G. B. Reid. 1997. *Modeling Mental Workload* Coll. « Models of Mental Workload »: United States Air Force Research Laboratory, 40 p.
- Scimmi, L. S., M. Melchiorre, M. Troise, S. Mauro et S. Pastorelli. 2021. « A Practical and Effective Layout for a Safe Human-Robot Collaborative Assembly Task ». *Applied Sciences*, vol. 11, n° 4, p. 1763.
- Scott, W. E. 1966. « Activation theory and task design ». *Organizational Behavior and Human Performance*, vol. 1, n° 1, p. 3-30.
- See, J. E., C. G. Drury, A. Speed, A. Williams et N. Khalandi. 2017. « The Role of Visual Inspection in the 21st Century ». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 61, n° 1, p. 262-266.
- Senders, J. W., et N. P. Moray. 1991. *Human Error: Cause, Prediction, and Reduction*. Coll. « Applied Psychology Series ». CRC Press, 168 p.
- Shani, A. B., R. M. Grant, R. Krishnan et E. Thompson. 1992. « Advanced Manufacturing Systems and Organizational Choice: Sociotechnical System Approach ». *California Management Review*, vol. 34, n° 4, p. 91-111.

- Shappell, S., et D. Wiegmann. 2000a. *The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS* (01/01). Springfield, Virginia: U.S Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 19 p.
- Shappell, S., et D. A. Wiegmann. 2017. *A Human Error Approach to Aviation Accident Analysis*. 184 p.
- Shappell, S. A., et D. A. Wiegmann. 1997. « A Human Error Approach to Accident Investigation: The Taxonomy of Unsafe Operations ». *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 7, n° 4, p. 269-291.
- Shappell, S. A., et D. A. Wiegmann. 2000b. « The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) ».
[https://www.skybrary.aero/index.php/Human_Factors_Analysis_and_Classification_System_\(HFACS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Human_Factors_Analysis_and_Classification_System_(HFACS)) >. Consulté le 10 Juillet 2021
- Shappell, S. A., et D. A. Wiegmann. 2000c. « The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) ».
[https://www.skybrary.aero/index.php/Human_Factors_Analysis_and_Classification_System_\(HFACS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Human_Factors_Analysis_and_Classification_System_(HFACS)) >. Consulté le 10 Juillet 2020.
- Sharit, J. 2006. « Human Error ». In *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. p. 708-760. John Wiley & Sons, Inc. < <http://dx.doi.org/10.1002/0470048204.ch27> >.
- Sharit, J. 2012. « Human Error and Human Reliability Analysis ». In *Handbook of Human Factors and Ergonomics*.
- Shorten, A., et J. Smith. 2017. « Mixed methods research: expanding the evidence base ». *Evidence Based Nursing*, vol. 20, n° 3, p. 74.
- Shrouf, F., J. Ordieres et G. Miragliotta. 2014. « Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm ». In *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. (9-12 Dec. 2014), p. 697-701.
- Singh, K., J. Maiti et K. Dhalmahapatra. 2019. « Chain of events model for safety management: Data analytics approach ». *Safety Science*, vol. 118, p. 568-582.
- Skinner, N., et J. Dorrian. 2015. « A work-life perspective on sleep and fatigue--looking beyond shift workers ». *Industrial health*, vol. 53, n° 5, p. 417-426.

- Sobel, J. O. N. 2019. « Liberating Machine Vision From the Machines ». < <https://www.wired.com/insights/2014/01/liberating-machine-vision-machines/> >. Consulté le 12 Septembre 2020.
- Spencer, M., K. Robertson et S. Folkard. 2006. *The development of a fatigue /risk index for shiftworkers*. United Kingdom: Health and Safety Executive (HSE), 82 p.
- Sperandio, J.-C. 1972. « Charge de travail et régulation des processus opératoires ». *Le travail humain*, p. 85-98.
- Stamatis, D. H. (494). 2003. *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*, 2nd. Wisconsin, U.S.A: Quality Press.
- Stanton, N. A., et C. Harvey. 2017. « Beyond human error taxonomies in assessment of risk in sociotechnical systems: a new paradigm with the EAST ‘broken-links’ approach ». *Ergonomics*, vol. 60, n° 2, p. 221-233.
- Stanton, N. A., et S. V. Stevenage. 1998. « Learning to predict human error: issues of acceptability, reliability and validity ». *Ergonomics*, vol. 41, n° 11, p. 1737-1756.
- Stiger, T. R., A. S. Kosinski, H. X. Barnhart et D. G. Kleinbaum. 1998. « Anova for repeated ordinal data with small sample size? a comparison of anova, manova, wls and gee methods by simulation ». *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, vol. 27, n° 2, p. 357-375.
- Sträter, O. 2019. « Human Reliability Assessment—State of the Art for Task- and Goal-Related Behavior ». In *Risk Based Technologies*, sous la dir. de Varde, Prabhakar V., Raghu V. Prakash et Narendra S. Joshi. p. 143-171. Singapore: Springer Singapore.
- Suresh, B. R., R. A. Fundakowski, T. S. Levitt et J. E. Overland. 1983. « A Real-Time Automated Visual Inspection System for Hot Steel Slabs ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-5, n° 6, p. 563-572.
- Svedung, I., et J. Rasmussen. 2002. « Graphic representation of accident scenarios: mapping system structure and the causation of accidents ». *Safety Science*, vol. 40, n° 5, p. 397-417.
- Swain, A. D. 1964. *THERP*. SC-R-64-1338: Sandia Corp., Albuquerque, N. Mex. < <https://www.osti.gov/servlets/purl/4613230> >. Consulté le 12 Juillet 2018.
- Swain, A. D., J. W. Altman et J. L. W. Rook. 1963. *HUMAN ERROR QUANTIFICATION*. SCR-610; CONF-621106-1: Sandia Labs., Albuquerque, N.Mex. (USA). < <https://www.osti.gov/servlets/purl/4287772> >. Consulté le 12 Juillet 2018.

- Swain, A. D., et H. E. Guttman. 1983. *Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications. Final Report* (1983/08/01). NUREG/CR-1278; SAND-80-0200. Albuquerque, NM (USA): Sandia National Labs, 711 p.
- Swain, M. G. 2000. « Fatigue in chronic disease ». *Clinical Science*, vol. 99, n° 1, p. 1-8.
- Swift, K. G., et J. D. Booker. 2013. « Chapter 10 - Assembly Systems ». In *Manufacturing Process Selection Handbook*, sous la dir. de Swift, K. G., et J. D. Booker. p. 281-289. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Thatcher, A., R. Nayak et P. Waterson. 2020. « Human factors and ergonomics systems-based tools for understanding and addressing global problems of the twenty-first century ». *Ergonomics*, vol. 63, n° 3, p. 367-387.
- Thayer, H. S. 1982. *Pragmatism, the Classic Writings: Charles Sanders Peirce, William James, Clarence Irving Lewis, John Dewey, George Herbert Mead*. Hackett Publishing.
- Thiffault, P., et J. Bergeron. 2003. « Fatigue and individual differences in monotonous simulated driving ». *Personality and Individual Differences*, vol. 34, n° 1, p. 159-176.
- Thoben, K.-D., S. Wiesner et T. Wuest. 2017. *"Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples*, 11. 4-19 p.
- Thomas, G. 2011. « A Typology for the Case Study in Social Science Following a Review of Definition, Discourse, and Structure ». *Qualitative Inquiry*, vol. 17, n° 6, p. 511-521.
- Thoroman, B., P. Salmon et N. Goode. 2020. « Evaluation of construct and criterion-referenced validity of a systems-thinking based near miss reporting form ». *Ergonomics*, vol. 63, n° 2, p. 210-224.
- Thorvald, P., F.-B. Å. Fasth et D. Romero. 2021. *The Cognitive Operator 4.0*.
- Thorvald, P., J. Lindblom et R. Andreasson. 2019. « On the development of a method for cognitive load assessment in manufacturing ». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, p. 252-266.
- Torres, Y., et S. Nadeau. 2020a. « The Future in Manufacturing—The Rise of Operator 4.0 ». *Substance ÉTS*. < <https://substance.etsmtl.ca/en/future-manufacturing-rise-operator-4-0> >. Consulté le 20 Mars 2021.

- Torres, Y., et S. Nadeau. 2020b. « Operator 4.0 in manufacturing: trends, potential technologies and future perspectives ». In *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft [Congress of the German Society of Ergonomics]*. (Berlin, Germany, March, 16th-18th). Vol. 66. GfA-Press.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2019a. « Application of human errors analysis in manufacturing: A proposed intervention framework and techniques selection ». In *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft [Congress of the German Society of Ergonomics]*. (Dresden, Germany, Feb. 27-Mar. 1). Vol. 65. GfA-Press.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2019b. « Assembly Guidance Systems in Aerospace Manufacturing ». *Substance ÉTS*. substance.etsmtl.ca. < <https://substance.etsmtl.ca/systemes-guideur-assemblage-fabrication-aerospatiale> >. Consulté le 20 Mars 2020, .
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2021a. « Application of SHERPA (Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach) as an Alternative to Predict and Prevent Human Error in Manual Assembly ». In *Proceedings of the 21st Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2021)*, sous la dir. de Black, Nancy L., W. Patrick Neumann et Ian Noy. p. 445-453. Cham: Springer International Publishing.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2021b. « Classification and quantification of human error in manufacturing: a case study in complex manual assembly ». *Applied Sciences*, vol. 11, n° 2, p. 749.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2021c. « Evaluation of Fatigue and Workload among Workers Conducting Complex Manual Assembly in Manufacturing ». *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, vol. 9, n° 1, p. 49-63.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2021d. « Evaluation of shift work scheduling and overtime allocation practices using the HSE Fatigue Index: application on complex manual assembly ». In *Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. (Bochum, Germany, Mar. 03-05). Vol. 67. GfA-Press.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2021e. « Work Schedules, Overtime, and Fatigue in Aerospace Manufacturing ». *Substance ÉTS*. < <https://substance.etsmtl.ca/en/work-schedules-overtime-fatigue-aerospace-manufacturing> >. Consulté le 20 Juillet 2021.
- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2022a. « Systems thinking approach in manufacturing: applying AcciMap and STAMP to the analysis of human errors in complex manual assembly ». *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 1-20

- Torres, Y., S. Nadeau et K. Landau. 2022. « Analysis of error-related quality deficiencies in manufacturing using systems approach: application of the HFACS framework ». In *Accepted to the 13th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2022)*. (New York, USA, July 24-28). AHFE International.
- Torres, Y., S. Nadeau et F. Morency. 2016. « Study of fatigue and workload among aircraft de-icing technicians ». *Occupational Ergonomics*, vol. 13, n° 2, p. 79-90.
- Transports Canada. 2007. « Système de gestion des risques liés à la fatigue pour le milieu aéronautique canadien: Introduction à la gestion de la fatigue ». Ottawa, Canada: Ministère des Transports, 16 p.
- Tsang, P. S. 2006. « Mental Workload ». In *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, sous la dir. de Karwowski, W., 2nd. CRC Press.
- Tsang, P. S., et M. A. Vidulich. 2006. « Mental Workload and Situation Awareness ». In *Handbook of Human Factors and Ergonomics*. p. 243-268. John Wiley & Sons, Inc.
- UK-CAA. 2007. *Aircrew fatigue: a review of research undertaken on behalf of the UK Civil Aviation Authority (UK-CAA)*. Norwich, UK: : Safety Regulation Group, 68 p.
- Underwood, P., et P. Waterson. 2012. « A critical review of the STAMP, FRAM and Accimap systemic accident analysis models ». In *Advances in human aspects of road and rail transportation*, sous la dir. de Stanton, N., p. 385-394. CRC Press.
- Underwood, P., et P. Waterson. 2013. « Systemic accident analysis: Examining the gap between research and practice ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 55, p. 154-164.
- Underwood, P., et P. Waterson. 2014. « Systems thinking, the Swiss Cheese Model and accident analysis: A comparative systemic analysis of the Grayrigg train derailment using the ATSB, AcciMap and STAMP models ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 68, p. 75-94.
- Urrestilla, N., et D. St-Onge. 2020. « Measuring Cognitive Load: Heart-rate Variability and Pupillometry Assessment ». In *Companion Publication of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction*. (Virtual Event, Netherlands), p. 405-410. Association for Computing Machinery.
- Van Assche, K., V. Valentinov et G. Verschraegen. 2019. « Ludwig von Bertalanffy and his enduring relevance: Celebrating 50 years General System Theory ». *Systems Research and Behavioral Science*, vol. 36, n° 3, p. 251-254.

- Vanneste, P., Y. Huang, J. Y. Park, F. Cornillie, B. Decloedt et W. Van den Noortgate. 2020. « Cognitive support for assembly operations by means of augmented reality: an exploratory study ». *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 143, p. 102480.
- Village, J., M. Greig, F. Salustri, S. Zolfaghari et W. P. Neumann. 2014. « An ergonomics action research demonstration: integrating human factors into assembly design processes ». *Ergonomics*, vol. 57, n° 10, p. 1574-1589.
- Waterson, P., D. P. Jenkins, P. M. Salmon et P. Underwood. 2017. « ‘Remixing Rasmussen’: The evolution of Accimaps within systemic accident analysis ». *Applied Ergonomics*, vol. 59, p. 483-503.
- Waterson, P., M. M. Robertson, N. J. Cooke, L. Militello, E. Roth et N. A. Stanton. 2015. « Defining the methodological challenges and opportunities for an effective science of sociotechnical systems and safety ». *Ergonomics*, vol. 58, n° 4, p. 565-599.
- Watson Nathaniel, F., M. S. Badr, G. Belenky, L. Bliwise Donald, M. Buxton Orfeu, D. Buysse, F. Dinges David, J. Gangwisch, A. Grandner Michael, C. Kushida, K. Malhotra Raman, L. Martin Jennifer, R. Patel Sanjay, F. Quan Stuart et E. Tasali. 2015. « Recommended Amount of Sleep for a Healthy Adult: A Joint Consensus Statement of the American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society ». *Journal of Clinical Sleep Medicine*, vol. 11, n° 06, p. 591-592.
- Wiegmann, D. A., et S. A. Shappell. 2001. « Human Error Perspectives in Aviation ». *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 11, n° 4, p. 341-357.
- Wilczek, F. 2021. *Fundamentals: ten keys to reality*. NY: USA: Penguin Press, 272 p.
- Williams, J. C. 2015. « Heart—A Proposed Method for Achieving High Reliability in Process Operation by Means of Human Factors Engineering Technology ». *Safety and Reliability*, vol. 35, n° 3, p. 5-25.
- Williamson, A., D. A. Lombardi, S. Folkard, J. Stutts, T. K. Courtney et J. L. Connor. 2011. « The link between fatigue and safety ». *Accident Analysis & Prevention*, vol. 43, n° 2, p. 498-515.
- Wilson, G. F., J. A. Caldwell et C. A. Russell. 2007. « Performance and Psychophysiological Measures of Fatigue Effects on Aviation Related Tasks of Varying Difficulty ». *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 17, n° 2, p. 219-247.
- Wilson, J. M. 2014. « Henry Ford vs. assembly line balancing ». *International Journal of Production Research*, vol. 52, n° 3, p. 757-765.

- Wolfartsberger, J., M. Heiml, G. Schwarz et S. Egger. 2019. « Multi-modal visualization of working instructions for assembly operations ». *Int J Mech Aerospace Ind Mechatron Manuf Eng*.
- Wong, I. S., S. Popkin et S. Folkard. 2019. « Working Time Society consensus statements: A multi-level approach to managing occupational sleep-related fatigue ». *Industrial health*, vol. 57, n° 2, p. 228-244.
- Wong, Y. C., K. Y. Wong et A. Ali. 2009. « Key Practice Areas of Lean Manufacturing ». In *2009 International Association of Computer Science and Information Technology - Spring Conference*. (17-20 April 2009), p. 267-271.
- Wu, B. 2000. « Fundamentals of Systems Approach to Manufacturing/Supply Systems Design and Operation ». In *Manufacturing and Supply Systems Management: A Unified Framework of Systems Design and Operation*, sous la dir. de Wu, B., p. 19-58. London: Springer London.
- Xia, P., A. Mendes Lopes et M. T. Restivo. 2013. « A review of virtual reality and haptics for product assembly: from rigid parts to soft cables ». *Assembly Automation*, vol. 33, n° 2, p. 157-164.
- Yang, K., L. Tao et J. Bai. 2014. « Assessment of Flight Crew Errors Based on THERP ». *Procedia Engineering*, vol. 80, p. 49-58.
- Yang, L., Q. Su et L. Shen. 2012. « A novel method of analyzing quality defects due to human errors in engine assembly line ». In *2012 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*. (20-21 Oct. 2012) Vol. 3, p. 154-157.
- Yang, S. T., M. H. Park et B. Y. Jeong. 2020. « Types of manual materials handling (MMH) and occupational incidents and musculoskeletal disorders (MSDs) in motor vehicle parts manufacturing (MVPM) industry ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 77, p. 102954.
- Yiannakides, D., et C. Sergiou. 2019. *Human Factors in Aircraft Maintenance*. CRC Press.
- Yilmaz, D., F. Tanrikulu et Y. Dikmen. 2017. « Research on Sleep Quality and the Factors Affecting the Sleep Quality of the Nursing Students ». *Current health sciences journal*, vol. 43, n° 1, p. 20-24.
- Yin, R. K. 2012. « A (very) brief refresher on the case study method ». In *Applications of case study research*. p. 18. SAGE Publications Ltd.

- Yokoi, T. 2013. « The research ethics guideline in ergonomics and human factors(Forum: Research ethics in psychonomics) ». *The Japanese Journal of Psychonomic Science*, vol. 31, n° 2, p. 193-197.
- Young, M. S., K. A. Brookhuis, C. D. Wickens et P. A. Hancock. 2015. « State of science: mental workload in ergonomics ». *Ergonomics*, vol. 58, n° 1, p. 1-17.
- Yung, M., A. Kolus, R. Wells et W. P. Neumann. 2020. « Examining the fatigue-quality relationship in manufacturing ». *Applied Ergonomics*, vol. 82, p. 102919.
- Yvonne Feilzer, M. 2010. « Doing Mixed Methods Research Pragmatically: Implications for the Rediscovery of Pragmatism as a Research Paradigm ». *Journal of Mixed Methods Research*, vol. 4, n° 1, p. 6-16.
- Zhang, J. 2017. « Cognitive manufacturing and Industry 4.0 ». < <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/manufacturing-industry-4-0/> >. Consulté le 14 Juin 2019.
- Zhang, X., M. C. Schall, H. Chen, S. Gallagher, G. A. Davis et R. Sesek. 2022. « Manufacturing worker perceptions of using wearable inertial sensors for multiple work shifts ». *Applied Ergonomics*, vol. 98, p. 103579.
- Zhang, Y., et A. Luximon. 2005. « Subjective mental workload measures ». *Ergonomia IJE&HF*, vol. 27, n° 3, p. 199-206.
- Zheng, L., X. Liu, Z. An, S. Li et R. Zhang. 2020. « A smart assistance system for cable assembly by combining wearable augmented reality with portable visual inspection ». *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, vol. 2, n° 1, p. 12-27.
- Zhu, X., S. J. Hu, Y. Koren et S. P. Marin. 2008. « Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, n° 5, p. 051013-051013-10.
- Zhu, Y., E. B. Weston, R. K. Mehta et W. S. Marras. 2021. « Neural and biomechanical tradeoffs associated with human-exoskeleton interactions ». *Applied Ergonomics*, vol. 96, p. 103494.
- Zlatanović, D., et J. Nikolić. 2017. « Strategic Decision Making From the Viewpoint of Systems Thinking: The Role of Values and Context ». In *Exploring the Influence of Personal Values and Cultures in the Workplace*, sous la dir. de Nedelko, Zlatko, et Maciej Brzozowski. p. 98-118. Hershey, PA, USA: IGI Global.