



HAL
open science

Etude multimodale pour la modélisation de la performance motrice humaine et de la santé dans une activité collaborative humain-robot

Kévin Bouillet

► **To cite this version:**

Kévin Bouillet. Etude multimodale pour la modélisation de la performance motrice humaine et de la santé dans une activité collaborative humain-robot. Ingénierie biomédicale. Université de Lorraine, 2023. Français. NNT : 2023LORR0289 . tel-04609657

HAL Id: tel-04609657

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-04609657>

Submitted on 12 Jun 2024

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

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



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

**Ecole Doctorale BioSE
Laboratoire DevAH**

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par **Kévin BOUILLET**

Sous la direction de **Gérome GAUCHARD** et **Sophie LEMONNIER**

**Etude multimodale de la performance humaine et de la
santé dans une activité collaborative humain-robot**

Le 19 octobre 2023

Membres du jury :

Rapporteurs :	Mme Frédérique HINTZY	Professeur des Universités – Université Savoie Mont Blanc
	M. William BERTUCCI	Professeur des Universités – Université de Reims Champagne-Ardenne
Examineurs :	Mme Liên WIOLAND	Dr., Responsable d'études, INRS, Nancy
	M. Benoit IUNG	Professeur des Universités, Université de Lorraine
	M. Alain BELLI	Professeur des Universités – Université de Saint-Etienne
Directeurs de thèse :	Mme Sophie LEMONNIER	Maître de conférences des Universités, Université de Lorraine
	M. Gérome GAUCHARD	Professeur des Universités, Université de Lorraine

Résumé :

Dans la transition vers l'Industrie 4.0, les cobots sont des robots conçus pour travailler dans le même environnement que des opérateurs humains. Ainsi, l'introduction de cobots change l'environnement de travail de l'opérateur et va nécessairement modifier le rapport entre l'opérateur et sa tâche. Ces modifications interrogent les répercussions sur la santé des opérateurs, et notamment en termes de troubles musculosquelettiques. Pour autant, ce n'est que dernièrement que certains auteurs se sont intéressés à ces répercussions, mais uniquement pour la transition d'une tâche individuelle à une tâche collaborative, avec des améliorations ergonomiques effectuées sur le poste de travail. Dans tous ces cas, l'introduction du cobot semble bénéfique pour la production et pour la santé des opérateurs. Cependant, il existe un manque dans la littérature sur l'influence de la présence du cobot dans un poste de travail collaboratif nouvellement hybride entre humain et cobot.

Ainsi, l'objectif central de ce travail de thèse est d'évaluer les répercussions de l'introduction d'un cobot sur les performances de production et sur les facteurs humains. Dans une première étude, nous avons comparé un système humain (deux humains) et un système hybride (un humain et un cobot) réalisant une même situation de travail collaborative, en évaluant les performances de production, les interactions entre les deux travailleurs, la posture du travailleur humain ainsi que sa charge cognitive. Les résultats ont montré que le système hybride était moins performant que le système humain en raison d'une baisse d'interactions et une augmentation de la charge cognitive du travailleur humain. En revanche, la posture semblait moins à risque face au co-travailleur cobot que face au co-travailleur humain. Ces résultats ont posé la question des raisons de cette amélioration de la posture : était-elle liée à la cadence de production moins importante ou à la présence du cobot lui-même ? Ainsi, dans une seconde étude, nous avons analysé les répercussions des modifications de deux paramètres de la cadence (vitesse et meneur) sur les mêmes paramètres de performance et de facteurs humains que dans la première étude. Les résultats ont indiqué que le fait de mener la cadence ou de la suivre ne semblait pas influencer les paramètres de performance et de santé lorsque la cadence imposée correspondait aux capacités du travailleur humain. En revanche, la cadence à suivre devait être ajustée aux capacités du travailleur : si celle-ci était trop importante une dégradation de ces paramètres étaient observés, réduisant ainsi l'efficacité de production en augmentant parallèlement les risques pour la santé du travailleur.

Par conséquent, ce présent travail de thèse a permis d'observer certains bénéfices et inconvénients de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail. Cependant, chaque situation de travail est différente : effectif, tâches, cadence, durée... Ainsi, avant d'introduire un cobot sur un poste de travail, il est nécessaire de faire une analyse fine de la situation de travail et de prendre en considération les modifications de la tâche (e.g., répartition des sous-tâches, cadence de production) et les capacités de l'opérateur dans le but d'au minimum maintenir les performances de production sans dégrader le capital santé de l'opérateur, et idéalement d'améliorer les deux.

Abstract :

In the transition towards Industry 4.0, cobots are robots designed to work in the same environment as human operators. As a result, the introduction of cobots alters the working environment for the operator, inevitably changing the relationship between the operator and their task. These changes raise questions about the impact on the health of operators, particularly in terms of musculoskeletal disorders. However, it is only recently that some researchers have focused on these repercussions, but mainly in the context of transitioning from individual tasks to collaborative tasks, with ergonomic improvements made to the workstation. In all these cases, the introduction of cobots appears beneficial for production and the health of operators. Nonetheless, there's a gap in the literature regarding the influence of cobot presence in a newly hybrid collaborative work setting involving both humans and cobots.

In that respect, the central objective of this thesis work is to assess the repercussions of introducing a cobot on production performance and human factors. In a first study, we compared a human system (two humans) with a hybrid system (one human and one cobot) engaged in the same collaborative work scenario, evaluating production performance, interactions between the two workers, the posture of the human worker, and their cognitive load. The results showed that the hybrid system performed less effectively than the human system due to a decrease in interactions, with an increase in the cognitive load of the human worker. However, the posture appeared to be less at risk when working alongside the cobot compared to another human co-worker. These results raised questions about the reasons for this posture improvement: was it linked to the lower production pace or to the presence of the cobot itself? Thus, in a second study, we analyzed the repercussions of changes in two parameters of the pace (speed and leader) on the same performance and human factor parameters as in the first study. The results indicated that leading or following the pace didn't seem to influence performance and health parameters when the imposed pace matched the capabilities of the human worker. However, the pace to be followed needed to be adjusted to the worker's abilities; if it was too demanding, a degradation of these parameters was observed, thereby reducing production efficiency while simultaneously increasing health risks for the worker.

Therefore, this thesis work has enabled the observation of certain benefits and drawbacks of introducing a cobot in a work setting. Nevertheless, each work situation is unique, involving factors like workforce, tasks, pace, and duration. Thus, before introducing a cobot into a workplace, a thorough analysis of the work situation is necessary, taking into consideration task

modifications (e.g., task allocation, production pace), and the capabilities of the operator. This is essential to at least maintain production performance without compromising the operator's health, and ideally, to enhance both aspects.

Remerciements :

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse, Jérôme Gauchard et Sophie Lemonnier. Vous m'avez toujours accordé votre confiance, du début jusqu'à l'aboutissement de ce manuscrit. Votre équilibre parfait entre autonomie et accompagnement m'a permis d'avancer dans ce travail de recherche et de grandir en tant que chercheur. Votre influence a été déterminante dans mon développement professionnel. Un merci supplémentaire s'adresse tout particulièrement à Sophie pour nos nombreuses réunions et tes relectures attentives de mes travaux. Ces échanges réguliers ont été précieux.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers les membres de mon comité de suivi individuel de thèse. Leurs conseils bienveillants, leur compétence et leur soutien m'ont guidé dans mes recherches. Je remercie également tous les membres du jury pour le temps consacré à la lecture de mes travaux et pour leur présence lors de ma soutenance.

Je tiens ensuite à remercier chaleureusement les équipes des laboratoires DevAH et PERSEUs, ainsi que la Faculté des Sciences du Sport de Nancy. Nos échanges stimulants et enrichissants ont été extrêmement précieux. Je souhaite également adresser mes remerciements à toutes les personnes du projet C-SHIFT, avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger sur mes travaux. Vos conseils ont nourri ma réflexion et ont contribué à l'avancement de mes recherches. Parmi les membres du projet C-SHIFT, je tiens à exprimer ma gratitude particulière à Muriel Lombard, directrice de l'AIP Lorrain, pour son accueil quotidien ainsi que lors de mes expérimentations dans leurs locaux.

Je voudrais également remercier toutes les personnes qui ont rendu possible la réalisation de mes travaux, en particulier les volontaires qui ont généreusement consacré une partie de leur temps à mes expérimentations. Au total, vous êtes 48 à avoir apporté votre contribution à la recherche, et je vous en suis extrêmement reconnaissant.

Sur un plan plus personnel, je tiens tout d'abord à remercier ma famille. Bien que vous n'ayez pas toujours compris les tenants et aboutissants de mes recherches, vous avez toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, bien avant le début de cette thèse. Votre confiance en moi a contribué à forger la personne que je suis aujourd'hui.

Je souhaite également adresser des remerciements particuliers aux équipes de l'After Foot. Depuis le début de ma thèse, et bien avant encore, vous m'avez accompagné au quotidien, que

ce soit à travers vos émissions radio ou vos revues. Vos discussions sur le football, mais aussi vos digressions, m'ont permis de m'évader mentalement de ma thèse.

Je voudrais également remercier Fabien. Au départ, tu étais l'un de mes enseignants, puis nous avons voyagé ensemble, en tant que collègues, à Nantes pour une conférence dès mon premier jour de thèse. Depuis, tu es devenu un collègue et un ami. Ta capacité à transformer de courtes pauses en discussions enrichissantes de vingt minutes est un don précieux que j'apprécie à chaque fois.

Maintenant, je tiens à remercier ceux qui ont formé notre petit groupe d'amis doctorants. Tout d'abord, Fred, nos chemins se sont croisés depuis notre L3 et ton sérieux et ton engagement dans ton travail ont toujours été une source de motivation. Merci également à toi, Damien, depuis notre rencontre lors de notre formation doctorale tu es toujours le même personnage que j'ai eu la chance de rencontrer. Les moments passés ensemble étaient souvent l'occasion de déconnecter temporairement nos cerveaux, nous permettant de mieux nous ressourcer et d'être plus efficaces dans notre travail. J'aimerais également remercier Pauline, que j'ai rencontrée lors de cette même formation. Nos discussions étaient toujours riches et agréables, nous permettant de nous évader de nos travaux. Enfin, merci à toi, Alex. Nous nous connaissons depuis le M1, et bien que tu ne comptes pas les marches dans les escaliers ni que tu ne fasses pas de retournées au volley, nous avons toujours réussi à nous comprendre. Tu as été un excellent collègue de travail, capable de mélanger les temps de travail et de repos tout en étant extrêmement efficace. Ce sera toujours un plaisir de te revoir, que ce soit sur le plan personnel ou professionnel.

Je tiens également à remercier mes amis qui m'ont accompagné tout au long de ces années de thèse. Justine, je te suis reconnaissant pour nos soirées jeux et nos sorties, tout comme Johan. Les moments passés avec vous ont toujours été formidables. Merci également à Laura et Régis. D'adversaires au badminton à coéquipiers de nos soirées jeux et amis, la distance de plus de 16 000 km pendant votre année en Australie n'a pas réussi à nous séparer.

Enfin, mes derniers remerciements, les plus importants, vont à toi, Cléa. Depuis le début de ma thèse, ton soutien et tes encouragements ont été une source de motivation constante tout au long de ces années. Tes relectures approfondies du manuscrit l'ont amélioré. Ce temps que tu as consacré est un exemple parmi tant d'autres du soutien inconditionnel que tu m'as apporté. Tu as toujours été là pour moi sur le plan personnel, m'encourageant dans tous mes projets, et je

suis extrêmement fier de toi et du projet dans lequel tu t'es lancée. En résumé, merci d'être la personne extraordinaire que tu es et d'être toujours présente à mes côtés.

Liste des abréviations :

LUE : Lorraine Université d'Excellence

AIP : Atelier Inter-établissement de Production

IFR : International Federation of Robotics

ISO : International Organization for Standardization

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

HRI : Interaction Humain-Robot

HRC : Collaboration Humain-Robot

TMS : Troubles Musculo-Squelettiques

HPMM : Human-robot-collaboration performance Measuring Model

H-IDLE : Human Idle

R-IDLE : Robot Idle

F-DEL : Fonctionnal Delay

C-ACT : Concurrent Activity

SNC : Système Nerveux Central

PMG : Programme Moteur Général

EMG : Electromyographie

MVC : Contraction Maximale Volontaire

RULA : Rapid Upper Limb Assessment

REBA : Rapid Entire Body Assessment

OCRA : Occupational Repetitive Action

OWAS : Ovako Working posture Analysing System

NIOSH : Nationale Institute for Occupational Safety and Health

INSHT : Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo

AL : Action Limit

MPL : Maximal Permissible Action

RWL : Recommanded Weight Lift

NASA-TLX : National Aeronautics and Space Adminsitration – Task Load Index

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

EEG : Electroencéphalogramme

ERP : Event-Related Potential

HRV : Heart Rate Variability

POC : Performance Operating Characteristic

ECG : Electrocardiogramme
FC : Fréquence cardiaque
I-VT : Velocity-Threshold Identification
I-HMM : Hidden Markov Model fixation Identification
I-MST : Minimum Spanning Trees Identification
I-DT : Dispersion-Threshold Identification
AOI : Area of Interest
RSI : Revised-Stress Index
SFP : Système Flexible de Production
CUSSTR : Commission Universitaire pour la Santé et la Sécurité au Travail Romande
IIS : Intervalle Inter-Stimulus
COB : Collaboration avec le Cobot
HUM : Collaboration avec l'Humain
COB2s : Collaboration avec le cobot et intervalle inter-stimulus de deux secondes
COB5s : Collaboration avec le cobot et intervalle inter-stimulus de cinq secondes
HUM2s : Collaboration avec un humain et intervalle inter-stimulus de deux secondes
HUM5s : Collaboration avec un humain et intervalle inter-stimulus de cinq secondes
ANOVA : Analyse de la variance
DM : Déclenchement Manuel
AUTO : Modalité Automatique
AUTO-SLOW : Condition Automatique – Cadence lente
AUTO-MEAN : Condition Automatique – Cadence moyenne
AUTO-FAST : Condition Automatique – Cadence rapide
UR : Universal Robots

Liste des figures :

Figure 1 : Evolution des révolutions industrielles (Muhuri et al., 2019). CPS = Cyber-Physical System. IoT = Internet of Things.	4
Figure 2 : Les neuf technologies piliers de l'Industrie 4.0 (Rüßmann et al., 2015).....	5
Figure 3 : Classification des robots selon l'INRS (Atain-Kouadio & Sghaier, 2017).....	8
Figure 4 : Différentes organisations au sein d'une équipe entre humains et robots (Yanco & Drury, 2004)	13
Figure 5 : Les différents types d'interaction Homme-robot (Onnasch et al., 2016).....	15
Figure 6 : Modèle d'évaluation HPMM d'une collaboration entre humain et robot (Schmidtler & Bengler, 2015).....	22
Figure 7 : Exemple d'une mesure objective de la fluidité de l'interaction (Hoffman, 2019). H-IDLE = Human Idle ; R-IDLE = Robot Idle ; F-DEL = Fonctionnal Delay ; C-ACT = Concurrent Activity.....	25
Figure 8 : Zones les plus atteintes par les TMS	32
Figure 9 : Modèle dynamique des TMS par l'INRS (Uguen et al., 2018).....	33
Figure 10 : Description du comportement moteur (Caporaso et al., 2020).....	36
Figure 11 : A/ Corps humain simplifié en six parties. B/ Articulations et segments du membre supérieur	39
Figure 12 : Contrôle moteur en A/ boucle ouverte et B/ boucle fermée	40
Figure 13 : Schéma de la théorie en boucle fermée d'Adams (Simonet, 1986)	43
Figure 14 : Description de la théorie des schémas (R. A. Schmidt, 1975).....	44
Figure 15 : Codage du dos, des membres supérieurs et inférieurs et de la charge (Grzybowska, 2010).....	50
Figure 16 : Les étapes à suivre lors de l'évaluation RULA	51
Figure 17 : Grille d'évaluation des positions articulaires pour les scores A et B dans la méthode RULA	52
Figure 18 : Tables A et B pour obtenir les scores A et B dans la méthode RULA.....	53
Figure 19 : Table C pour obtenir le score final dans la méthode RULA	54

Figure 20 : Pour chaque cadre, il faut trouver le symbole "". Dans le cadre de gauche il "saute aux yeux" tandis que dans le cadre de droite il nécessite plus de recherche (Lemonnier et al., 2021a).....	67
Figure 21 : Construction des fixations, des saccades et du scanpath à partir des coordonnées du regard (Lemonnier et al., 2021b).....	71
Figure 22 : Dimensions de l'opérateur pour une évaluation d'une HRI (liste non exhaustive)	82
Figure 23 : A/ Produit fini ; B/ Vue supérieure du plan de travail, zone co-travailleur pour les cercles gris clair, zone participant pour le cercle violet et zone collaborative pour le cercle vert	91
Figure 24 : Processus de fabrication du produit, avec à gauche du plan de travail dans cette vue, la place du participant, et à droite celle du co-travailleur, ici le cobot. A/ le cobot est en attente de l'instruction du participant ; B/ le participant dépose le produit SFP dans le carénage qui a été déposé par le cobot sur le socle central ; C/ le participant visse un premier coup ; D/ le participant visse une seconde fois après la rotation du produit de 120° effectuée par le cobot ; E/ le participant visse une troisième et le produit est désormais fini ; F/ le cobot évacue le produit et amène le prochain carénage.	92
Figure 25 : Le cobot YuMi.....	94
Figure 26 : Actions du co-travailleur et du participant et interactions entre le co-travailleur et le participant.....	98
Figure 27 : A/ Centrales inertielles posées sur le corps d'un participant dans la modalité COB ; B/ Représentation de l'avatar sur le logiciel Xsens MVN	99
Figure 28 : Vision à la première personne de la scène visuelle d'un participant par les lunettes oculomètres.	101
Figure 29 : Schéma des passations possibles	104
Figure 30 : Nombre de produits fabriqués en quatre minutes. *** $p < 0,001$	108
Figure 31 : Taux d'inactivité du participant en quatre minutes. *** $p < 0,001$	111
Figure 32 : Taux d'interactions entre le participant et le co-travailleur en quatre minutes. *** $p < 0,001$	113
Figure 33 : Scores RULA pour le côté gauche et pour le côté droit. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$	115
Figure 34 : Scores RULA moyens des deux côtés pendant les activités du participant. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$	121

Figure 35 : Nombre de fixations et durée moyenne des fixation (en ms) pendant un essai. * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001	124
Figure 36 : Diamètre pupillaire moyen pendant un essai. * p < 0,05 ; ** p < 0,01	126
Figure 37 : Questionnaire NASA-TLX. A gauche les six échelles pour les six dimensions. A droite la comparaison par paire des dimensions.....	150
Figure 38 : Schéma de passations possibles.....	152
Figure 39 : Nombre de produits fabriqués et nombre d'étapes réussies en trois minutes. Les traits rouges correspondent aux nombres de produits attendus et étapes à effectuer. * p < 0,05 ; *** p < 0,001.....	156
Figure 40 : Taux d'interactions entre le participant et le cobot en trois minutes. ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.....	162
Figure 41 : Scores RULA pour le côté gauche et pour le côté droit. * p < 0,05.....	164
Figure 42 : Scores moyens RULA pendant les actions du participant pour les deux côtés. * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.	169
Figure 43 : Score du NASA-TLX pour les quatre conditions. * p < 0,05 ; ** p < 0,01 ; *** p < 0,001.....	172

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Actions du co-travailleur et du participant. En souligné la description des actions. En italique les sous-tâche pour chaque action..... 97

Tableau 2 : Segments et articulations analysés par les logiciels Xsens MVN Analyse Pro 2021.0.0 et MATLAB 100

Tableau 3 : Performances à la tâche auditive. Les résultats de l'erreur absolue sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre les modalités 2s et 5s. 109

Tableau 4 : Actions du co-travailleur. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM..... 110

Tableau 5 : Actions du participant. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM ou entre les modalités 2s et 5s.... 111

Tableau 6 : Temps passé pour les scores RULA pour les deux côtés (en %). r3, r4, r5 et r6 correspondent respectivement aux scores 3, 4, 5 et 6 lors de l'évaluation RULA. G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM..... 116

Tableau 7 : Scores RULA pour les articulations mesurées dans l'évaluation RULA. G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM ou entre les modalités 2s et 5s..... 117

Tableau 8 : Position angulaire des articulations des membres supérieurs, de la nuque et du dos (en °). G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart

interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM. 119

Tableau 9 : Comparaison entre les scores RULA des deux côtés lors des actions du participant pour l'ensemble des conditions et les modalités de la TM. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois variables sur une colonne, des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre le côté gauche et le côté droit. 123

Tableau 10 : Scores RULA pour les deux côtés lors des actions du participant selon la condition. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). * représente une différence significative entre le côté gauche et le côté droit. 123

Tableau 11 : Amplitudes et vitesses moyennes des saccades. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). 125

Tableau 12 : Pourcentage de produits fabriqués par rapport au nombre de produits attendus et pourcentage d'étapes réussies par rapport au nombre d'étapes attendues. ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. 157

Tableau 13 : Performances à la tâche auditive. Les résultats de l'erreur absolue sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 158

Tableau 14 : Actions du cobot. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 159

Tableau 15 : Actions du participant. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 160

Tableau 16 : Temps passé pour les scores RULA pour les deux côtés (en %). r3, r4, r5 et r6 correspondent respectivement aux scores 3, 4, 5 et 6 lors de l'évaluation RULA. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 165

Tableau 17 : Scores RULA pour les articulations mesurées dans l'évaluation RULA. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 166

Tableau 18 : Position angulaire des articulations des membres supérieurs, de la nuque et du dos. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole. 167

Tableau 19 : Comparaison entre les scores RULA des deux côtés lors des actions du participant selon la condition. * différence significative entre le côté gauche et le côté droit..... 170

Tableau 20 : FC moyenne (en bpm) pendant trois minutes. 171

Tableau 21 : Valeurs et scores des six dimensions du NASA-TLX. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole..... 172

SOMMAIRE

PREAMBULE	1
1 DE LA ROBOTIQUE TRADITIONNELLE A LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE	3
1.1 L'industrie 4.0	3
1.1.1 Qu'est-ce que l'industrie 4.0 ?	3
1.1.2 L'industrie 4.0 : ses nouvelles technologies clés.....	5
1.2 De la robotique à la cobotique	7
1.2.1 Les robots	7
1.2.2 Les cobots : en quoi diffèrent-ils des robots traditionnels ?.....	9
1.3 Les interactions humain-robot.....	11
1.3.1 Définition des interactions humain-robot.....	11
1.3.2 Les bénéfices et inconvénients des interactions	16
1.3.3 La sécurité du travailleur dans les interactions.....	18
1.3.4 L'acceptabilité et l'acceptation du cobot.....	19
1.3.5 La communication entre humains et robots.....	20
1.4 Evaluation de l'interaction	21
1.4.1 Evaluer la collaboration entre un humain et un robot : le modèle HPMM.....	21
1.4.2 La fluidité de l'interaction : mesure de leur qualité.....	22
1.5 Les performances du travailleur	27
1.5.1 La sécurité	28
1.5.2 L'ergonomie	28
1.5.3 La productivité	28
1.6 Les troubles musculosquelettiques (TMS).....	29
1.6.1 L'accident du travail : la fatigue comme un des facteurs principaux	29
1.6.2 Les TMS : le trouble majeur du monde industriel.....	30
1.6.3 Les causes multifactorielles d'apparition de TMS	32
2 POSTURE DE L'OPERATEUR : UN ÊTRE HUMAIN EN MOUVEMENT DANS SON ENVIRONNEMENT	35
2.1 Le comportement moteur : entre neurosciences et biomécanique	36
2.1.1 Approche neuroscientifique du mouvement humain.....	36
2.1.2 Approche biomécanique du mouvement humain	38
2.2 Le contrôle moteur : boucle ouverte et boucle fermée.....	40
2.2.1 Contrôle en boucle ouverte.....	41
2.2.2 Contrôle en boucle fermée	41

2.3	L'apprentissage moteur.....	42
2.3.1	L'apprentissage moteur en boucle fermée : contribution des feedbacks	42
2.3.2	L'apprentissage moteur en boucle ouverte : la théorie des schémas	43
2.3.3	L'apprentissage : comment influe-t-il sur la variabilité du geste ?.....	44
2.4	Mesures du comportement moteur	46
2.4.1	L'électromyographie : l'activité électrique du muscle témoin de son activation	46
2.4.2	Les mesures de force : la cinétique.....	47
2.4.3	La motion capture : la cinématique du corps pour décrire les mouvements et postures.....	47
2.5	Méthodes d'évaluation des TMS	48
2.5.1	L'équation NIOSH : limite d'action et limite maximale admissible	49
2.5.2	La méthode OWAS	50
2.5.3	La méthode RULA	50
2.5.4	L'évaluation RULA : méthode d'évaluation des risques très répandue	54
3	ATTENTION VISUELLE ET CHARGE COGNITIVE : DES RESSOURCES LIMITÉES DANS L'ACCOMPLISSEMENT DES TÂCHES.....	56
3.1	Charge cognitive.....	56
3.1.1	Définitions et mesures	56
3.1.2	Double tâche.....	59
3.1.3	Stress	64
3.2	L'attention visuelle.....	65
3.2.1	Définition de l'attention visuelle.....	65
3.2.2	Les processus attentionnels : la sélection visuelle par les processus bottom-up et top-down	66
3.2.3	Les différents processus décrits par différents modèles	69
3.2.4	Les mesures de l'attention visuelle : l'oculométrie	70
4	PROBLEMATIQUE.....	75
4.1	Un cobot dans une situation collaborative : quels impacts ?.....	75
4.1.1	Systèmes humain et hybride : deux environnements différents pour l'opérateur	75
4.1.2	La cadence : influence sur les sollicitations biomécaniques et les facteurs psychosociaux	78
4.1.3	Problématique générale du travail de thèse	79
4.2	Choix de la tâche : une tâche en laboratoire inspirée de situations réelles.....	81
4.3	Evaluation d'une HRI : analyse multidimensionnelle pour l'optimiser	82
4.3.1	La performance de l'opérateur au service de la production	83
4.3.2	Les interactions entre les co-travailleurs du système : leur fluidité.....	83
4.3.3	La posture de l'opérateur humain : les TMS comme conséquence d'une posture à risque	84
4.3.4	La charge cognitive : autre facteur de risques des TMS.....	84
4.3.5	Stress de l'opérateur : une réponse psycho-physiologique face à une situation	85

4.3.6	Autres dimensions de l'opérateur	85
4.4	Objectifs du travail de thèse.....	86
4.4.1	Etude 1 : performances de production et facteurs humains des opérateurs pour un système humain et un système hybride	86
4.4.2	Etude 2 : performances de production et facteurs humains des opérateurs pour un système hybride à différentes cadences de production	87
5	ETUDE 1 : COMPARAISON DE LA PERFORMANCE ET DES FACTEURS HUMAINS ENTRE UN SYSTEME HUMAIN ET UN SYSTEME HYBRIDE REALISANT LA MÊME TÂCHE COLLABORATIVE	89
5.1	Méthode	90
5.1.1	Participants	90
5.1.2	Matériel et tâches	90
5.1.3	Procédure.....	102
5.1.4	Analyse des données	105
5.2	Résultats.....	107
5.2.1	Performances aux tâches	107
5.2.2	La fluidité des interactions entre le participant et le co-travailleur	109
5.2.3	La posture du participant	114
5.2.4	Le comportement oculomoteur	124
5.2.5	Corrélations	126
5.3	Discussion.....	127
5.3.1	Influences négatives du cobot par son introduction	127
5.3.2	Influences bénéfiques du cobot par son introduction : amélioration de la posture et réduction des contraintes biomécaniques sur l'opérateur	135
5.3.3	Amélioration de la posture de l'opérateur : par l'introduction du cobot ou par la réduction de la cadence de production ?	136
5.3.4	Influence du niveau de difficulté de la seconde tâche	138
5.4	Conclusion	141
6	ETUDE 2 : IMPACT DE DEUX PARAMETRES DE LA CADENCE SUR LA PERFORMANCE ET LES FACTEURS HUMAINS DANS UN SYSTEME HYBRIDE COLLABORATIF	143
6.1	Méthode	145
6.1.1	Participants	145
6.1.2	Matériel et tâches	145
6.1.3	Procédure.....	151
6.1.4	Analyse des données	153

6.2	Résultats.....	155
6.2.1	Performances aux tâches	155
6.2.2	La fluidité dans les tâches	158
6.2.3	La posture du participant.....	163
6.2.4	Le stress : la fréquence cardiaque (FC)	171
6.2.5	La charge cognitive	171
6.2.6	Corrélations	176
6.3	Discussion.....	177
6.3.1	La production : entre amélioration de celle-ci et diminution de son efficacité	178
6.3.2	La qualité des interactions dépendante du rythme de la cadence et non du meneur.....	181
6.3.3	La santé de l'opérateur : des sollicitations biomécaniques et une charge cognitive influencées par le rythme de la cadence et non par le meneur.....	184
6.4	Conclusion	189
7	DISCUSSION GENERALE	191
7.1	Récapitulatif des résultats : un système hybride moins performant mais moins à risque pour la santé de l'opérateur, en lien avec la cadence	191
7.1.1	Une production dépendante des capacités du cobot ?	192
7.1.2	Une posture moins à risque face au cobot ?	193
7.1.3	Attention, stress et charge cognitive : effets de la cadence ou du cobot ?.....	195
7.2	Une situation de travail inspirée de conditions écologiques, mais en laboratoire	197
7.2.1	Le cobot : un cobot parmi les nombreux cobots.....	197
7.2.2	La situation de travail : du laboratoire au terrain.....	199
7.3	Recommandations pour l'introduction d'un cobot dans une situation de travail collaboratif.....	201
7.3.1	Introduire un cobot pour une production efficiente... ..	202
7.3.2	... sans mettre en danger la santé de l'opérateur	203
8	CONCLUSION GENENRALE	205
	Bibliographie.....	207
	Valorisations pendant la thèse	243

PREAMBULE

Depuis quelques années, la notion d'Industrie 4.0 est utilisée pour parler de l'Industrie du Futur. En France, le programme « Industrie du Futur » a débuté en 2015 avec l'objectif de permettre aux entreprises françaises de rattraper leur retard industriel et de regagner en compétitivité face aux entreprises internationales. Dans cette nouvelle ère industrielle, les processus de fabrication se veulent plus flexibles, plus numériques et plus écologiques. De nouvelles technologies émergent, avec notamment les robots collaboratifs, de plus en plus nombreux dans les usines. Ces robots collaboratifs, également appelés cobots, incarnent un nouveau type de robots qui permettraient un travail plus flexible et une proximité physique avec les humains, rendant possibles de nouvelles interactions entre l'humain et le robot.

En 2019, l'action exploratoire Lorraine Université Excellence (LUE) nommée « Introduction Impact of intelligent collaborative devices such as Cobots in the service of Human activity at work in consistence with the challenges of Industry of the Future », abrégée C-SHIFT, a débuté pour une période de trois ans. Ce projet avait pour but : d'une part d'enrichir les diagnostics « Industrie du futur » avec les problématiques du travail ; d'autre part d'accompagner les entreprises dans leurs efforts de transformations vers les nouvelles formes d'usines.

Ainsi, ce projet interdisciplinaire s'est décomposé en plusieurs axes avec pour chacun des actions précises. Premièrement, l'axe Organisation a étudié l'émergence de nouvelles routines de production mais aussi la disponibilité des ressources humaines des opérateurs et leur gestion dans un nouveau contexte de collaboration. Deuxièmement, l'axe Santé avait pour but d'analyser les caractéristiques biomécaniques, physiologiques et psychologiques de la performance motrice en lien avec l'introduction d'un cobot mais aussi d'analyser des nouveaux risques liés à l'interaction. Troisièmement, l'axe Adaptation a étudié l'amélioration de la sécurité physique des employés et l'exploration de nouveaux types d'interactions pour promouvoir l'acceptabilité, l'efficience et l'efficacité. Ce présent travail de thèse s'inscrit dans l'axe Santé du projet et constitue le travail central de cet axe.

Les travaux de cette étude ont eu lieu au sein de l'AIP Lorraine (Atelier Inter-établissement de Production), où la présence de systèmes robotiques et cobotiques a permis la mise en place de situations expérimentales dites de laboratoire. Les objectifs de ce travail de thèse sont d'étudier les différents facteurs humains d'un opérateur lors de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail collaboratif mais aussi de créer une amorce de trame d'évaluation d'une

interaction humain-robot regroupant un maximum de facteurs humains pouvant être influencés par la présence d'un cobot dans son environnement.

1 DE LA ROBOTIQUE TRADITIONNELLE A LA ROBOTIQUE COLLABORATIVE

Nous allons débiter ce travail de thèse en situant le contexte actuel, avec la révolution industrielle en cours depuis quelques années, en la définissant ainsi que la cobotique qui est une des technologies clés de cette nouvelle industrie. Les interactions entre l'humain et la robotique, qui devraient être modifiées par cette révolution industrielle et certaines nouvelles technologies, vont également être définies dans ce chapitre. Enfin, la santé de l'opérateur humain va conclure ce chapitre puisque nous nous pencherons sur les troubles musculosquelettiques, dans ses définitions et ses origines.

1.1 L'industrie 4.0

1.1.1 Qu'est-ce que l'industrie 4.0 ?

Au début de ce XXI^{ème} siècle, l'industrie connaît une nouvelle révolution, passant de l'Industrie 3.0 à une Industrie 4.0. La Figure 1 décrit les différentes révolutions industrielles au cours du temps avec les différentes avancées qui les ont permises. L'Industrie 1.0 date du XVIII^{ème} siècle avec la première révolution industrielle notamment par l'utilisation de machines à vapeur. Cependant, à cette époque, la production était limitée à l'effort manuel humain. Au XIX^{ème} siècle, l'Industrie 2.0 se mettait en place grâce à l'électricité qui permettait aux machines, devenues moins encombrantes, de produire plus rapidement, augmentant les flux de production. Ensuite, au XX^{ème} siècle, période de l'Industrie 3.0 qui a débuté avec le fordisme et le taylorisme, l'automatisation a permis d'optimiser les processus de production et améliorer la productivité grâce à des machines ou robots plus ergonomiques et plus sûrs (Badri et al., 2018 ; Muhuri et al., 2019).

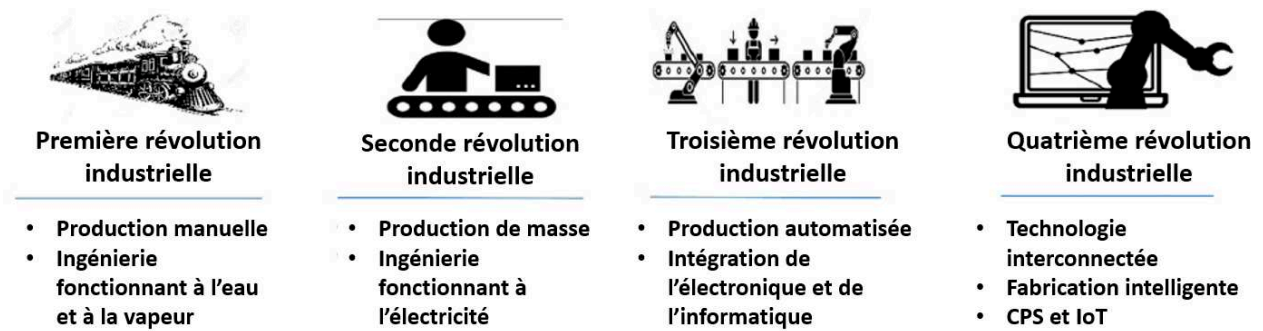


Figure 1 : Evolution des révolutions industrielles (Muhuri et al., 2019). CPS = Cyber-Physical System. IoT = Internet of Things.

La notion d'industrie 4.0 a été introduite pour la première fois par le gouvernement allemand en 2011 pour parler de cette nouvelle révolution de l'industrie. Le concept « Industrie 4.0 » est complexe à définir. En effet, l'Association Allemande pour les Technologies de l'information, des Télécommunications et des nouveaux Médias relève plus d'une centaine de définitions de cette nouvelle industrie (Bidet-Mayer, 2017). Dans un rapport à la Commission Européenne de 2017, il est indiqué qu'elle « vise à faire avancer la fabrication numérique en augmentant la numérisation et l'interconnexion des produits, des chaînes de valeurs et des modèles commerciaux. Elle vise également à soutenir la recherche, la mise en réseau des partenaires industriels et la normalisation »¹ (Klitou et al., 2017b, p. 3). Ce projet d'industrie 4.0 se définit en deux axes de développement : d'une part, par des changements, notamment des périodes de développement courtes, de l'individualisation, de la flexibilité, de la décentralisation et de l'efficacité des ressources ; d'autre part, par une plus grande automatisation et mécanisation, une digitalisation, un réseautage et une miniaturisation (Lasi et al., 2014). L'entrée dans l'industrie 4.0 « nous amène au prochain niveau de fabrication où les machines se redéfiniront dans la façon dont elles communiquent et exécutent des fonctions individuelles »² (Muhuri et al., 2019, p. 218). En France, le programme Industrie du Futur a été lancé en 2015 pour cette nouvelle révolution industrielle (Klitou et al., 2017a).

¹ “Aims to drive digital manufacturing forward by increasing digitization and the interconnection of products, value chains and business models. It also aims to support research, the networking of industry partners and standardization”.

² “To take us to the next level of manufacturing where machines will redefine themselves in the way they communicate and perform individual functions”.

Cette révolution, encore nouvelle, pose des questions sur le plan des bénéfices de celle-ci, de la santé et de la sécurité au travail.

1.1.2 L'industrie 4.0 : ses nouvelles technologies clés

Différentes technologies sont considérées comme piliers de cette nouvelle industrie (Rüßmann et al., 2015). Celles-ci sont au nombre de neuf et sont présentées dans la Figure 2 puis sont décrites par la suite :



Figure 2 : Les neuf technologies piliers de l'Industrie 4.0 (Rüßmann et al., 2015).

- Big Data : c'est un ensemble très volumineux de données issues de nombreuses bases d'informations (e.g., des équipements, des systèmes de production et de gestion). Des outils et techniques, tel que le machine learning, sont disponibles pour exploiter une grande masse de données de production au sujet de diverses informations ;
- Robots autonomes : les robots sont plus autonomes, flexibles et coopératifs que les robots précédents, permettant de travailler en toute sécurité à côté des humains. Leur flexibilité plus importante permet une plus grande gamme de capacités. Leur autonomie permet de travailler ensemble avec des ajustements automatiques de leurs actions. Leur coût est également moins important que les robots classiques ;

- Simulation : elle modélise le monde physique en un monde virtuel dans lequel l'opérateur peut interagir. Elle s'appuie notamment sur la réalité virtuelle. Les outils de modélisation permettent l'analyse des produits, des performances des lignes de production et de la coordination des réseaux par le biais de simulation des performances des aspects du système de production. Cela a pour but d'optimiser les processus industriels et opérations ;
- Intégrations horizontale et verticale des systèmes : l'intégration horizontale a pour but de contrôler le réseau d'approvisionnement et de distribution tandis que l'intégration verticale intègre les filières de production. Ces deux intégrations sont des modes de communication qui permettent la gestion autonome des organisations industrielles. Les entreprises, les départements d'une entreprise, les fonctions et les capacités sont interreliés pour être plus uniformes ;
- Internet des objets (*Internet of Things*) : plus d'appareils reposent sur de l'informatique, et sont embarqués et interconnectés. La communication en temps réel des objets physiques peut être exploitée pour surveiller en temps réel les produits et les systèmes d'état et faciliter la décentralisation de la prise de décision ;
- Cybersécurité : systèmes permettant de protéger les systèmes industriels et les lignes de fabrication contre les cyber-attaques. Sécuriser un plus grand nombre de canaux de communication sans réduire la performance des réseaux ;
- Cloud computing : accès à des services informatiques via Internet par un fournisseur. La communication et l'échange d'informations sont élargis par des technologies de cloud computing avec des moyens faciles de connectivité réseau. Les données et les applications sont disponibles partout, tout le temps, par n'importe quel terminal ;
- Fabrication additive : elle permet de prototyper et de produire des composants individuels. Elle permet la production de petits lots de produits personnalisables avec des conceptions complexes et légères. Les systèmes de fabrication additifs décentralisés permettent de réduire les distances de transport et le stock à portée de main ;
- Réalité augmentée : comme pour la simulation, elle plonge l'opérateur dans un monde virtuel qui reflète le monde physique. Les lunettes intelligentes, la réalité augmentée et la réalité virtuelle sont de plus en plus utilisées dans les procédés de fabrication. Ils peuvent être utilisés pour simuler un environnement contenant des objets réels et pour améliorer la conception et les processus de fabrication.

Parmi ces différents piliers, ce travail de thèse s'intéresse à un en particulier : les robots autonomes. En effet, avec l'Industrie 4.0 qui se veut plus flexible, des robots dits collaboratifs sont mis en place dans les entreprises.

1.2 De la robotique à la cobotique

1.2.1 Les robots

Les robots sont une des technologies importantes dans les processus d'automatisation de l'Industrie 3.0 (Muhuri et al., 2019). En effet, le premier robot a été utilisé par le groupe General Motors en 1961 (Girasa, 2020 ; Głagowski et al., 1992), et depuis son nombre croît d'année en année, étant passé d'environ 600.000 à 1.600.000 entre 1995 et 2015 dans le monde. Plus récemment cette augmentation s'est accélérée avec plus de 3.000.000 robots dans le monde en 2020 (IFR, 2021).

Les progrès technologiques ont permis d'améliorer les robots en favorisant l'autonomie, la capacité sensorielle, la miniaturisation des régulateurs ainsi qu'en baissant leurs coûts (Fryman & Matthias, 2012). En raison de ces différentes avancées, des normes ont été mises en place pour sécuriser les travailleurs humains, mais aussi pour définir les différents types de robots.

Il existe de nombreuses définitions des robots. Par exemple, le robot est « une machine qui peut se comporter indépendamment, comme une personne humaine pour effectuer des tâches mécaniques spécifiques de manière automatique, soit en autonomie soit en semi-autonomie »³ (Girasa, 2020, p. 28). Quant à elle, la norme internationale ISO 8373:2021 définit un robot comme « un mécanisme actionné, programmé avec un degré d'autonomie pour effectuer de la locomotion, de la manipulation ou du positionnement »⁴.

En 2017, Atain-Kouadio et Sghaier, en lien avec l'INRS, ont classé les robots en s'appuyant sur les normes ISO 8373, 10218 et 13482. Cette répartition des robots est représentée dans la

³ “A machine that can behave independently like a human person to perform specific mechanical chores automatically, either autonomously or semi-autonomously”.

⁴ “Programmed actuated mechanism with a degree of autonomy to perform locomotion, manipulator or positioning”.

Figure 3. Les robots peuvent être classés en trois catégories : les robots médicaux (destinés à l'usage médical), les robots de service et les robots industriels.

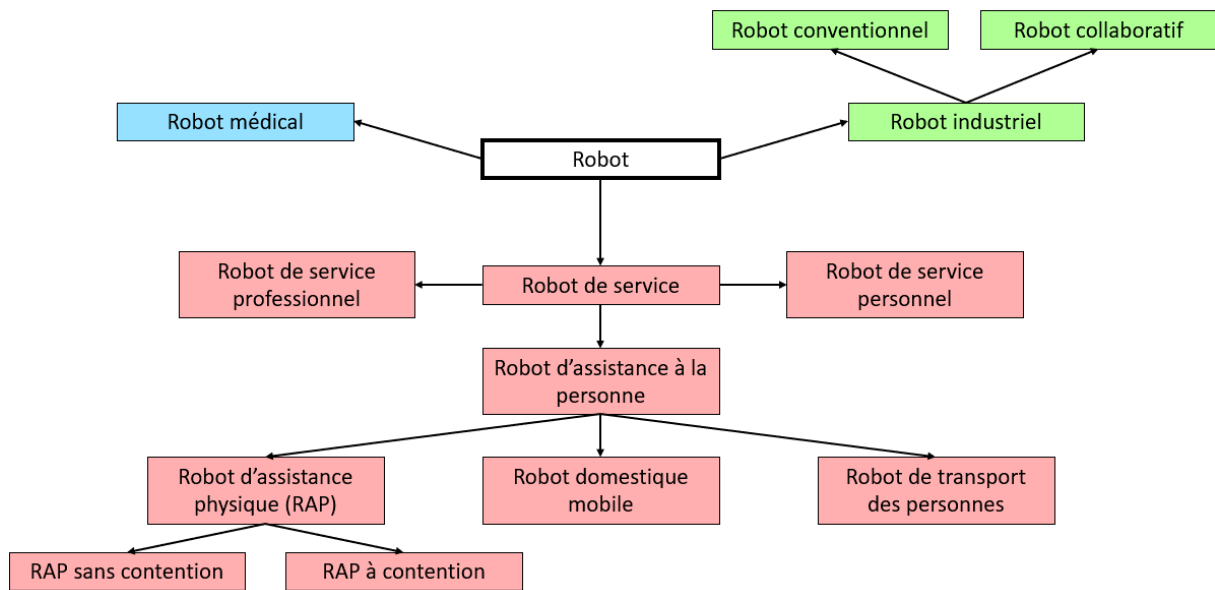


Figure 3 : Classification des robots selon l'INRS (Atain-Kouadio & Sghaier, 2017).

Un robot de service est un « robot qui exécute des tâches utiles pour les personnes, ou équipement sauf application d'automatisation industrielle » (ISO 13482:2014, 3.4). Les robots de service se décomposent également en plusieurs catégories :

- Les robots de service professionnel qui sont utilisés « pour une tâche commerciale, habituellement par un opérateur qualifié » (ISO 8373:2012, 2.12). Ce sont par exemple des robots nettoyeurs pour les lieux publics ou des robots anti-incendie.
- Les robots de service personnel qui sont utilisés « pour une tâche non commerciale, habituellement par des personnes non spécialisées » (ISO 8373:2012, 2.11). Ils peuvent être des fauteuils roulants automatiques ou des robots domestiques par exemple.
- Les robots d'assistance à la personne qui sont des « robots de service accomplissant des actions qui contribuent directement à l'amélioration de la qualité de vie des individus, à l'exclusion des applications médicales » (ISO 13482:2014, 3.13).

Dans la dernière catégorie ci-dessus se trouve les robots d'assistance physique, définis comme des robots « destinés à aider physiquement un utilisateur à exécuter des tâches requises en complétant ou en augmentant ses capacités personnelles » (ISO 13482:2014, 3.15). Ainsi, des contacts physiques avec les humains sont possibles avec les robots d'assistance à la personne. Les robots d'assistance physique se décomposent en deux catégories : ceux sans contention, c'est-à-dire non attachés à l'ensemble du corps (e.g., les aides à la marche motorisées, des

cobots) et ceux à contention qui sont solidaires du corps humain (e.g., les exosquelettes d'assistance physique non médicaux). Cependant, cette dichotomie entre ceux à contention et ceux sans contention ne fait pas l'unanimité car elle se centre uniquement sur la norme, alors que les cobots et les exosquelettes sont également utilisés en tant que robots industriels, comme expliqué par la suite. Outre les robots d'assistance physique, les robots d'assistance à la personne peuvent également être des robots domestiques mobiles (également appelés robots d'assistance à la personne mobile) qui se déplacent pour exécuter des tâches domestiques en interaction avec des individus (ISO 13482:2014, 3.14), ou des robots de transport de personne pour transporter des individus ou animaux vers une destination (ISO 13482:2014, 3.16).

Un robot industriel est un « manipulateur à commande automatique, reprogrammable, multi applications, pouvant être programmé suivant trois axes ou plus, qui peut être fixe ou mobile, destiné à être utilisé dans les applications d'automatisation industrielle » (ISO 10218-1:2011, 3.10). Le robot industriel peut être un robot conventionnel ou un robot collaboratif également appelé « cobot ». Le contexte conventionnel désigne l'usage, en production, d'un robot complètement isolé de l'humain par une enceinte de protection. Le contexte collaboratif désigne l'usage, en production, d'un robot partageant le même espace de travail que l'humain ou interagissant directement avec celui-ci.

Dans ce présent travail de thèse, nous portons notre intérêt sur la dernière catégorie de robots présentée, et plus particulièrement dans le contexte collaboratif. Nous allons décrire ce que sont ces nouveaux robots collaboratifs et quelles sont leurs différences avec les robots dits traditionnels.

1.2.2 Les cobots : en quoi diffèrent-ils des robots traditionnels ?

Jusqu'à récemment, les robots dits traditionnels étaient généralement placés dans des cages et interagissaient entre eux, l'opérateur humain n'avait pas d'interaction direct avec le robot. Maintenant, des robots collaboratifs, notamment équipés d'un système de détection et de perception avancée, permettent des interactions sûres entre les humains et eux (Tantawi et al., 2019).

Le terme cobot est apparu à la fin du XX^{ème} siècle et constitue un néologisme issu de la somme des termes « robot » et « collaboration ». Les cobots sont définis comme des robots conçus pour

collaborer avec les humains, pour interagir, physiquement ou non, dans un espace de travail partagé (Shravani & Rao, 2018a). Ils sont classés dans les robots industriels, décrits précédemment (Atain-Kouadio & Sghaier, 2017 ; ISO 10218-1:2011). Contrairement au léger recul du nombre de robots industriels traditionnels, le nombre de cobots croît ces dernières années, ayant doublé entre 2017 et 2020 pour atteindre environ 22.000 robots collaboratifs (IFR, 2021).

La cobotique est un nouveau domaine scientifique qui étudie les systèmes collaboratifs entre humains et robots (Claverie et al., 2013). La cobotique s'inscrit dans le projet de l'industrie française depuis 2013 avec la publication du plan « France robot initiative ». Elle est également placée comme un des quarante-sept points des « Technologies clés 2020 » sous la désignation « Cobotique et Humain augmenté » (Direction Générale des Entreprises, 2015). Tandis que la robotique se penche uniquement sur les performances du robot, la cobotique apparaît à la croisée de « la robotique, l'ergonomie et la cognitique » (Salotti et al., 2017, p.2). Elle inclut la représentation du cobot par l'humain, l'ergonomie de l'espace de travail, l'acceptabilité du travailleur, les interactions humain-cobot, l'efficacité du couple et la dynamique spatio-temporelle. L'interface humain-système, l'intelligence artificielle ainsi que les facteurs humains sont trois domaines à prendre en compte dans la cobotique (Salotti et al., 2017).

Dans le monde industriel, les cobots sont conçus pour un actionnement direct avec les opérateurs dans le but de fournir un environnement de fabrication flexible et d'aider les humains lors de l'accomplissement de tâches communes (Hentout et al., 2019). L'opérateur effectue des tâches, notamment celles qui ne peuvent pas être réalisées par le cobot (Petrucci et al., 2019), et d'autres tâches sont déléguées à celui-ci. Utilisés en interaction directe avec un travailleur humain, ils peuvent par exemple « manipuler une charge ensemble dans une zone conçue pour cette interaction » (ISO 10218-2:2011).

Il existe différents moyens de classer les systèmes cobotiques. D'une part, il est possible de les classer en s'intéressant au robot, c'est-à-dire en distinguant leur degré d'autonomie, leur mobilité, leur architecture, leur éloignement des opérateurs présents, mais aussi leur capacité de transport, de manipulation ou encore leur taille. Cependant, avec cette classification, l'humain n'est pas pris en compte dans le système cobotique. D'autre part, la classification peut être faite selon les niveaux d'interaction entre le système cobotique et l'opérateur. Différentes

classifications et la description de celles-ci sont présentées dans la suite de ce travail (cf., 1.3.1 « Définition des interactions humain-robot »).

Dans le monde de l'industrie, les robots industriels, dont les cobots, se retrouvent principalement dans les secteurs de l'automobile, de la fabrication de produits électriques et électroniques, des produits en métal, de la plasturgie, de la chimie alimentaire et de l'alimentaire (IFR, 2021).

Depuis les années 2000, le domaine de la collaboration humain-robot s'est fortement développé (Claverie et al., 2013). Les industries cherchent à moderniser leurs plans de travail pour répondre aux attendus en termes d'efficacité et d'adaptabilité de l'Industrie du Futur. Ainsi, la question des interactions entre les humains et les machines s'est largement développée, avec notamment les questions sur les risques de ces interactions proches, mais aussi les avantages de celles-ci.

1.3 Les interactions humain-robot

1.3.1 Définition des interactions humain-robot

Les interactions humain-robot (HRI) correspondent au « processus qui transmet les intentions de l'humain et des descriptions de l'interprétation de la tâche en une séquence des capacités du robot et des exigences de travail »⁵ (Fang et al., 2013). Cette transmission peut se faire de manière explicite, l'information est transmise délibérément, ou de manière implicite, la transmission étant involontaire (e.g., l'expression faciale). Dans cette citation, l'intention de l'opérateur correspond au désir de l'opérateur de réaliser la tâche (Bi et al., 2019). Ainsi, dans les systèmes humain-robot, également appelés systèmes hybrides, le type de tâche influence les interactions entre les deux entités. Lors de la réalisation de cette tâche commune, celle-ci doit être correctement réalisée pour éviter l'apparition de divers problèmes qui pourraient créer des effets négatifs à cette interaction.

⁵ the process that conveys the human operators' intention and interprets the task descriptions into a sequence of robot motions complying with the robot capabilities and the working requirements.

La criticité de la tâche se décompose en trois niveaux selon le degré d'effets négatifs en cas de problème (Yanco & Drury, 2004) : d'un niveau faible (e.g., un robot footballeur lors d'une rencontre contre une autre équipe de robot, la défaillance n'aura pas d'impact grave hormis une défaite au match) à un niveau élevé (e.g., un robot de sauvetage-déblaiement lors d'une urgence en terrain dangereux, la défaillance peut entraîner des conséquences importantes pour les personnes à secourir, mais aussi pour le reste de l'équipe de sauvetage).

La réalisation d'une tâche s'inscrit dans un espace-temps qui contraint le système humain-robot. Une taxonomie des systèmes humain-robot a été proposée en se basant sur ces contraintes (Ellis et al., 1991). Sur le plan temporel, la tâche peut s'exécuter soit de manière synchrone (i.e., les entités du système accomplissent la tâche en même temps) soit de manière asynchrone (i.e., ils la réalisent à des moments différents). Sur le plan spatial, la tâche peut être de manière colocalisée (i.e., ils sont situés au même endroit) ou non-colocalisée (i.e., ils ne sont pas au même endroit pour accomplir la tâche).

Contrairement au système entre humain(s) et robot(s) traditionnel(s) qui travaillent de manière séparée ou côte à côte, l'automatisation des cobots permet à ces nouveaux systèmes de fonctionner comme une équipe. Les interactions humain-robot concernent les liens entre les deux pour la réalisation des tâches tandis que les systèmes humain-robot se définissent selon le nombre d'humain(s) et de cobot(s) présents dans l'environnement de travail et leur nombre d'interactions. Ces interactions peuvent être diverses. Dans un même espace de travail, le nombre de robots collaboratifs et d'humains peuvent varier tout comme les interactions entre chacun d'entre eux. Différentes compositions de ces systèmes sont présentées dans la Figure 4 (Yanco & Drury, 2004). Comme nous le verrons par la suite, dans ce travail de thèse, c'est plus particulièrement la situation A que nous avons étudiée, avec une situation collaborative face à face entre deux co-travailleurs.

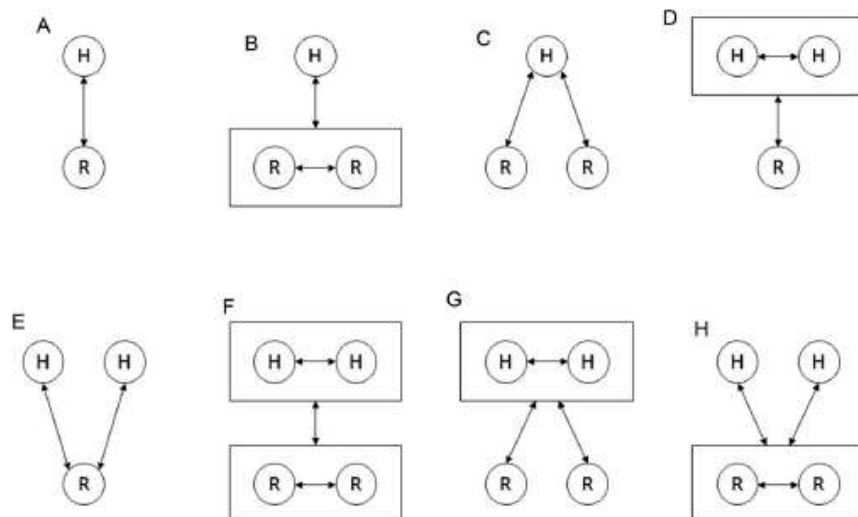


Figure 4 : Différentes organisations au sein d'une équipe entre humains et robots (Yanco & Drury, 2004)

Les interactions peuvent donc être diverses selon l'organisation au sein d'une équipe donnée, mais le niveau de ces interactions peut également varier, notamment en fonction du degré d'autonomie du système robotique et de la proximité entre l'humain et le cobot. Le niveau d'autonomie correspond au temps où le robot peut contribuer de lui-même à une tâche sans intervention de l'humain sur lui. Il faut faire attention à ne pas confondre l'autonomie, qui est la capacité à s'autogouverner et se réguler face à des situations nouvelles sans aide extérieure, avec l'automatisation qui est dépourvue de conscience, sans réelle prise de décision par un ensemble de règles préétablies (Berthoz & Petit, 2014 ; Moulières-Seban, 2017). Entre l'humain et le cobot, les interactions dépendent également de la proximité. Ainsi, les interactions se distinguent en deux catégories (Goodrich & Schultz, 2007) : celles à distance où l'humain et le cobot sont séparés spatialement ou temporellement ; celles à proximité où l'humain et le cobot sont dans le même environnement.

Ainsi, nous avons vu que différents facteurs peuvent influencer les interactions humain-robot, tels que le type de tâche et sa criticité, les contraintes spatio-temporelles de sa réalisation, la taille et la composition du système humain-robotique, l'autonomie du robot, la proximité entre humain(s) et robot(s). Plusieurs travaux ont donc eu pour objectif de proposer une catégorisation de ces interactions. Nous allons en détailler trois : selon le type de co-manipulation (Lamy, 2011), selon le rôle de l'humain (Salotti et al., 2017 ; Scholtz, 2003) et pour finir selon le type d'assistance (Hentout et al., 2019).

Dans la première classification, les modalités d'interaction sont définies à partir de la co-manipulation décrite « par le fait qu'un opérateur humain et un robot manipulent conjointement

un outil (ou un objet) dans le même espace de travail » (Lamy, 2011, p. 22). Trois catégories de co-manipulation ont été proposées sur cette base, de celle avec le moins d'interactions à celle avec le plus : la co-manipulation parallèle où les efforts de l'humain et ceux du robot s'ajoutent pour former un effort final au niveau de l'outil ou objet ; la co-manipulation orthétique où les efforts sont répartis sur plusieurs points de contact (e.g., les exosquelettes) ; la co-manipulation sérielle où le déplacement de l'outil est la résultante du mouvement de l'humain avec celui du résultat.

La deuxième classification s'effectue à partir du rôle de l'opérateur (Salotti et al., 2017 ; Scholtz, 2003). Scholtz a distingué différents rôles pour l'humain à partir des niveaux d'interaction avec le robot. Tout d'abord, avec des interactions ou très peu (voire aucune), l'humain peut endosser les rôles d'opérateur de maintenance, de designer ou de programmeur. Cependant, ces trois rôles ne concernent pas la cobotique du fait du manque d'interactions directes avec le robot (Salotti et al., 2017). Ensuite, les rôles de spectateur (pour lequel l'humain n'a pas de réelle interaction avec le robot bien qu'il se situe dans son environnement voire dans sa zone de travail) et de co-travailleur (l'humain se situe dans le même environnement de travail et peut avoir des interactions avec le robot) permettent des interactions entre le travailleur humain et le robot. Enfin, les rôles de superviseur (l'humain donne les instructions au robot et vérifie son travail en étant dans sa zone de travail) et d'opérateur (l'humain commande le robot qui n'a que très peu d'autonomie décisionnelle) sont les deux rôles qui présentent le plus d'interactions entre l'humain et le robot. Cette classification est intéressante par la caractérisation du type d'interaction pour définir le rôle de l'humain, cependant elle ne prend pas en compte le degré d'autonomie du robot collaboratif et l'intensité de couplage (Salotti et al., 2017).

Dans la troisième classification, Hentout et ses collaborateurs (2019) décrivent trois types d'interactions entre l'humain et le robot à partir des quatre critères définissant les systèmes hybrides par Bortot en 2014. Ces critères correspondent à l'espace de travail (i.e., l'espace où robots et humains travaillent), le temps de travail (i.e., le temps où humains et robots travaillent dans l'espace de travail), le but (i.e., robots et humains ont des objectifs, pouvant concorder ou non) ainsi que les contacts (avec la présence des opérateurs dans le même environnement que le robot, des contacts volontaires ou non sont possibles). Dans cette classification, illustrée dans la Figure 5, le plus faible niveau d'interaction entre l'humain et le robot est la coexistence. Elle correspond au partage d'un espace de travail dynamique entre humain et robot sans but commun

ni contact entre eux, ni coordination, ni action commune. Lors d'une coexistence, les interactions observées sont liées au fait que l'humain cherche à éviter d'entrer en collision avec le robot. Avec un niveau d'interaction plus important que la coexistence, la coopération décrit les interactions entre un humain et un robot lorsqu'ils travaillent dans le même espace de travail avec un but commun, cependant ils remplissent des exigences de temps et d'espace pour éviter tout contact. Enfin, le niveau avec le plus d'interactions est la collaboration. Dans ce cas, l'humain et le robot accomplissent une tâche complexe avec des interactions directes physiques, avec de possibles contacts. Lors d'une collaboration, l'humain et le robot sont dans le même espace de travail avec un but partagé.

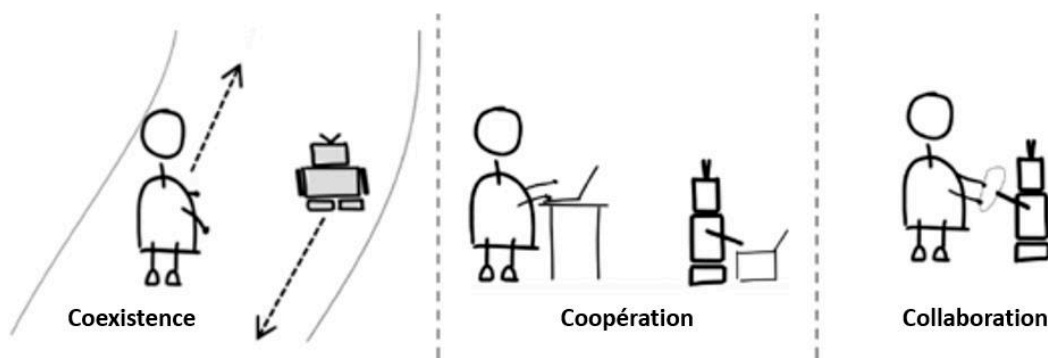


Figure 5 : Les différents types d'interaction Homme-robot (Onnasch et al., 2016)

Lorsque l'interaction est maximale dans la troisième classification, donc lors d'une collaboration (Hentout et al., 2019), les HRI peuvent être considérées comme une collaboration humain-robot (HRC ou *Human-Robot Collaboration*). Dans cet environnement, une sous-classification permet de distinguer quatre degrés d'interactions (Cesta et al., 2016 ; Helms et al., 2002). Le cobot et l'humain interagissent dans le même espace de travail selon différentes modalités : indépendante (ils travaillent sur des pièces différentes sans aucune collaboration physique), synchrone (ils travaillent de manière séquentielle sur les différents composants du même produit), simultanée (ils effectuent différentes tâches sur le même produit en même temps) et coopérative (ils effectuent les mêmes tâches ensemble sur le produit).

Pour résumer, dans ce travail de thèse, différentes taxonomies tirées de plusieurs de ces classifications vont être utilisées. Les participants prennent le rôle d'opérateur dans leurs interactions avec le cobot car ils commandent le robot collaboratif qui n'a que très peu d'autonomie décisionnelle (Scholtz, 2003). Ce rôle permet le plus d'interactions possibles entre l'humain et le cobot. Puisque nous nous intéressons aux plus hauts niveaux d'interactions entre humain et cobot pour voir l'impact des cobots sur l'opérateur, nous conservons la distinction

entre la coopération et la collaboration (Hentout et al., 2019) pour décrire les interactions du système. En effet, dans nos situations expérimentales, l'humain et le cobot, ont un but commun et partagent le même espace de travail, la collaboration entre les deux pouvant être synchrone ou simultanée (Cesta et al., 2016).

Les cobots permettent donc des interactions directes avec des humains dans le même environnement de travail, en synergie, dans le but d'accomplir une tâche commune avec de potentiels contacts physiques. Ainsi, les interactions entre humains et cobots diffèrent de celles avec des robots traditionnels, du fait notamment de la proximité physique possible entre eux. Ces nouvelles interactions présentent des avantages et des inconvénients nouveaux par rapport aux interactions entre humains et robots traditionnels.

1.3.2 Les bénéfices et inconvénients des interactions

L'objectif de l'industrie 4.0, avec l'introduction des robots collaboratifs, n'est pas de remplacer l'humain par des robots, mais de profiter des avantages de ces deux entités pour une production plus efficace et flexible.

Puisque la fabrication d'un produit peut se faire de manière sérielle à différents postes de travail dans un ordre préétabli, formant une ligne de montage, l'introduction des cobots dans les sites de production va modifier ces lignes de production, créant de nouvelles interactions entre les humains et les robots. Auparavant, l'apport des humains et celui des robots sur le produit dans les lignes de production étaient séparés. Ils disposaient d'espaces définis et les robots étaient généralement dans des cages pour assurer la sécurité de l'humain. Chacune des deux entités présente des avantages et des limites dans ce système de production.

L'humain possède une motricité fine liée à la coordination de petits muscles dans les mouvements, notamment ceux des doigts. Cette motricité fine lui permet de manipuler des composants complexes et de petite taille, mais aussi d'exécuter des processus d'assemblage complexes de manière fiable, de charger et de recharger les différents composants (Hentout et al., 2019). Les humains peuvent également fournir une certaine force motrice permettant la fabrication des produits. Ses capacités de perception, ainsi que son intelligence, lui permettent de s'adapter à de nouvelles situations, le rendant très flexible. En effet, au contraire du robot qui est programmé pour exécuter une série d'actions, l'humain peut réaliser différentes tâches,

en s'adaptant à une nouvelle ou un nouveau poste de travail. Les robots, quant à eux, ont un contrôle intégré des processus et une lecture exacte des chemins définis par un opérateur. Ils peuvent effectuer des performances fiables dans des activités répétitives pendant une longue durée, contrairement à l'humain. De plus, les robots sont capables de manipuler des composants lourds et dangereux, sans contrainte de sécurité (Hentout et al., 2019).

En outre, les HRI tirent parti des avantages des deux entités, ceux de l'humain et ceux du robot. En effet, la collaboration entre les deux associe la dextérité, la flexibilité, la perception et l'intelligence de l'humain avec la répétabilité et la précision du robot (Tsarouchi et al., 2016). Elles utilisent également les capacités cognitives de l'humain comme la perception, l'adaptabilité et la capacité à résoudre des problèmes dans des environnements non structurés. Toutes ces caractéristiques correspondent à celles de l'usine du futur (Zäh et al., 2009). Cette collaboration a pour objectif d'améliorer l'efficacité, la flexibilité et la productivité dans l'industrie, tout en réduisant le stress ergonomique ainsi que les charges physique et cognitive et les contraintes biomécaniques de l'humain.

Cependant, les interactions entre l'humain et la machine ne présentent pas que des bénéfices. De nouveaux problèmes peuvent apparaître, tels que les interactions avec d'autres plateformes de robots automatisés, l'observation des communications entre l'humain et le cobot, la programmation ou reprogrammation de ce dernier, les tests à effectuer pour le fonctionnement de ce couple ainsi que la maintenance du cobot, les diagnostics des erreurs et la réparation en cas de problème (Tsarouchi et al., 2016). Lors d'une collaboration humain-cobot, nouvelle pour un opérateur, celui-ci peut ressentir des sentiments négatifs comme de l'inquiétude et un stress négatif, tel que la détresse car il sort de sa zone de confort en raison d'une situation inconnue (Müller et al., 2017). L'augmentation du stress engendre nécessairement une baisse de la performance collaborative.

De nouveaux risques sont apparus par rapport à la robotique traditionnelle (Charpentier & Sghaier, 2013 ; Murashov et al., 2016). Avec la cobotique, en plus des risques déjà existants, sont apparus les collisions, en raison du travail à proximité permis par les nouvelles normes, les troubles musculosquelettiques (TMS), avec une problématique de déplacement de ces troubles (Atain-Kouadio & Sghaier, 2017) et les risques psychosociaux avec une surcharge mentale en raison de la proximité ou de la vitesse du cobot inadaptée à la cadence de production de l'opérateur.

L'introduction d'un cobot doit donc être contrôlée et ne doit pas mettre en danger la santé de l'opérateur. C'est pourquoi des normes en matière de sécurité ont été mises en place pour la cobotique.

1.3.3 La sécurité du travailleur dans les interactions

La problématique des blessures physiques des opérateurs est présente depuis longtemps et la question de la sécurité de ceux-ci est d'un intérêt majeur pour les usines. L'introduction de robots collaboratifs dans des systèmes humain-robotique, du fait de la proximité physique entre autres, crée de nouveaux risques pour les humains, dont celui des contacts physiques. Ainsi, cette proximité physique doit être encadrée et la sécurité redéfinie à partir de cette nouvelle problématique (Bicchi et al., 2008).

Tout d'abord, l'interaction doit respecter les lois de la robotique formulée pour la première fois en 1942 par l'écrivain Asimov, dont la première qui stipule « qu'un robot ne doit pas porter atteinte à un être humain, ou en restant passif qu'un être humain ne se blesse »⁶ (Bo et al., 2016). Du fait de la proximité entre le cobot et l'humain, de nouvelles normes de sécurité sont à respecter. La nomenclature, ISO 10218:2014, traite des « exigences de sécurité pour les robots industriels ». Il est nécessaire de pouvoir arrêter le robot afin de garantir la sécurité de l'opérateur quand certaines conditions ne sont plus respectées. Les fonctions qui arrêtent le robot lors de la violation de ces conditions sont des fonctions de surveillance incluses dans les fonctions d'arrêt. Ces fonctions de sécurité doivent répondre à des exigences de fiabilité définies par les normes, notamment la norme ISO 13849:2015 « Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relative à la sécurité ». Il existe trois types de sécurité pour les cobots : intrinsèque, par contrôle moyen ou pré-collision et par contrôle réactif ou post-collision (Santis & Siciliano, 2008).

L'interaction et les contacts entre humains et robots collaboratifs sont donc autorisés sous certaines conditions. La sécurité des opérateurs est assurée par le système de commande du

⁶ A robot may not injure a human being or, through inaction, allow a human being to come to harm.

robot (capteurs d'effort, détecteurs de présence) et complétée par ses caractéristiques physiques (faible inertie, limitation de la force et vitesse, formes non agressives). En plus de la sécurité physique des opérateurs, une sécurité mentale doit être assurée en ayant conscience du mouvement des robots et en évitant les postures effrayantes pour l'opérateur, ainsi que les mouvements brusques (Nonaka et al., 2004).

1.3.4 L'acceptabilité et l'acceptation du cobot

Tout d'abord, il est important de comprendre ces deux terminologies. L'acceptabilité correspond aux « intentions des utilisateurs à utiliser ou non la nouvelle technologie » tandis que l'acceptation se définit comme « son usage effectif » (Wioland et al., 2019). Si l'on place ces notions sur un continuum temporel par rapport à l'introduction de la technologie, l'acceptabilité correspond à la prédiction de l'utilisation de la technologie en amont de son introduction alors que l'acceptation correspond à l'évaluation de son utilisation en aval de l'introduction de celle-ci.

Bobillier-Chaumon (2013, 2016) décompose les notions d'acceptabilité et d'acceptation à travers trois orientations théoriques qui sont l'acceptabilité pratique, l'acceptabilité sociale et l'acceptation située. L'acceptabilité pratique a pour but une meilleure conception ergonomique de la technologie dans le but de répondre aux besoins pratiques de l'activité et de favoriser l'acceptation de cette technologie par l'utilisateur. L'acceptabilité sociale a pour but de prédire les intentions d'usage de la technologie avant son intégration. Cela nécessite d'interroger les futurs utilisateurs sur leur représentation de cette technologie et sur leur utilisation future pour éviter un rejet de celle-ci en amont de son introduction. L'acceptation située évalue l'usage effectif de cette technologie à la suite de son introduction. Elle s'évalue notamment à travers quatre dimensions : individuelle (l'activité propre à l'opérateur), organisationnelle (le rapport entre l'opérateur et l'organisation du travail), relationnelle (les collectifs de travail) et professionnelle (la construction et la reconnaissance identitaire).

La confiance dans la technologie peut impacter l'acceptabilité et l'acceptation de l'utilisateur. Cette confiance dépend des informations que l'opérateur a sur le cobot, notamment par son expérience (Charalambous et al., 2016). Les mouvements du cobot peuvent influencer la confiance de l'humain envers celui-ci lors de leurs interactions. Les mouvements considérés

comme plus intuitifs et naturels pour l'humain, tels que ceux en ligne droite, améliorent le bien-être, les performances et la confiance par rapport à des mouvements incurvés (Bortot, 2014 ; Huber et al., 2008). Pour des interactions efficaces entre un cobot et un humain, ce dernier doit comprendre l'intention du cobot et faire confiance à ses mouvements (Bengler et al., 2012). Ainsi, la confiance de l'opérateur envers le cobot est influencée par l'humain, le cobot et son environnement (Hancock et al., 2011).

L'introduction d'un cobot permet des interactions avec l'humain avec une forte proximité physique entre les deux. Hall et ses collaborateurs (1968) ont défini différentes zones pour l'humain selon la distance avec une autre personne : une zone intime (inférieure à 0,45m) ; une zone personnelle (entre 0,45m et 1,2m) ; une zone sociale (entre 1,2m et 3,6m) ; une zone publique (supérieure à 3,6m). Ainsi, le cobot peut entrer dans sa zone personnelle, voire sa zone intime. L'engagement de l'humain dans la collaboration peut s'évaluer par sa distance avec un autre humain ou un robot, mais aussi par son regard, ses mouvements de la tête, ses expressions faciales, sa gestuelle. Cependant, l'engagement d'un humain dans une HRI s'est évalué au travers des interactions sociales avec un robot de service (Ben Youssef et al., 2019 ; Tapus & Mataric, 2008 ; Vaufreydaz et al., 2016), mais pas avec un robot collaboratif dans l'exécution d'une tâche commune, à notre connaissance. De plus, l'ennui et la frustration sont des facteurs qui ont un impact négatif sur l'engagement (Ben Youssef et al., 2019). L'engagement de l'utilisateur peut influencer son acceptation de la technologie.

1.3.5 La communication entre humains et robots

Dans toute collaboration, une certaine communication est nécessaire au bon fonctionnement de celle-ci et à la performance collaborative (Fowler et al., 2008 ; Marks et al., 2001 ; Marlow et al., 2018). La communication entre deux, ou plusieurs, entités peut être verbale ou non verbale. C'est la parole qui permet la communication verbale, tandis qu'il existe plusieurs modalités pour la communication non verbale. En effet, un individu peut donner des indications à une autre entité par sa gestuelle, par une interface, par un contact physique, par la posture et par le regard. Pour une bonne communication, il faut un émetteur qui transmet une information ainsi qu'un, ou plusieurs, récepteur(s) pour capter cette information.

Dans une collaboration entre uniquement des humains, les deux modes de communication peuvent être utilisés pour se transmettre les informations nécessaires à la bonne collaboration. Pour que cette dernière fonctionne entre un humain et une machine, il est donc également nécessaire d'avoir une communication, même minime, entre les deux entités.

Ainsi, il est possible d'instaurer une communication verbale entre les entités. Pour cela, le robot peut parler à l'humain pour lui donner des consignes ou mouvements à effectuer (Nikolaidis et al., 2018). Si le robot est équipé d'une commande vocale, c'est l'humain qui peut s'adresser verbalement au robot pour le programmer (Pires, 2005) ou pour le commander (Hudson et al., 2017). Cependant, la reconnaissance verbale n'est pas toujours fiable en raison des conditions environnementales, en considérant le bruit ambiant par exemple, l'accent de la personne qui parle ou encore l'utilisation de certains termes non reconnus par le logiciel. C'est pourquoi la communication non verbale est la plus fiable pour communiquer entre humains et robots. Les modes de communication non verbale entre humains et robots sont similaires : celle-ci peut passer par la gestuelle de l'opérateur (Gilbert, 2009 ; Neto et al., 2013), par des contacts physiques (Doisy, 2012 ; Stolt et al., 2011), des interfaces ou des joysticks (Tadano & Kawashima, 2007) et aussi le regard (Li & Zhang, 2017 ; Shi et al., 2021 ; Tatarian et al., 2021).

Dans les études de ce travail de thèse, le mode de communication choisi est celui non verbal. Le cobot transmet des informations à l'humain par sa posture et sa gestuelle, tandis que l'humain transmet des informations au cobot par une interface, lorsqu'elle est présente, et par des contacts physiques.

1.4 Evaluation de l'interaction

1.4.1 Evaluer la collaboration entre un humain et un robot : le modèle HPMM

Les réponses de l'humain peuvent être décomposées en trois catégories : tout d'abord ses réponses comportementales, puis cognitives et enfin affectives (Peruzzini et al., 2017). Ces trois types de réponses seront décrites plus en détails dans la suite de ce chapitre.

Un modèle d'évaluation de la collaboration entre un humain et un robot a été conçu par Schmidler et Bengler en 2015 : Human-Robot-Collaboration Performance Measuring Model ou HPMM (Figure 6). Ce modèle fonctionne telle une boucle, où les nouvelles connaissances,

liées aux mesures effectuées, permettent de repenser la tâche de départ. Ces feedbacks comprennent l'efficacité, l'efficacité et la satisfaction de l'utilisateur. L'efficacité s'évalue en termes de mouvements (i.e., les paramètres cinématiques) et de précision (i.e., contrôle de celui-ci), tandis que l'efficacité dépend du temps et de l'accomplissement de la tâche. La satisfaction de l'utilisateur est quant à elle une mesure subjective. En combinant toutes ces informations, l'évaluation de la performance de la collaboration entre l'humain et le robot est obtenue. Les caractéristiques du mouvement de l'humain sont importantes à identifier, analyser et interpréter pour comprendre les besoins et intentions des opérateurs dans cette collaboration (Schmidtler et al., 2014).

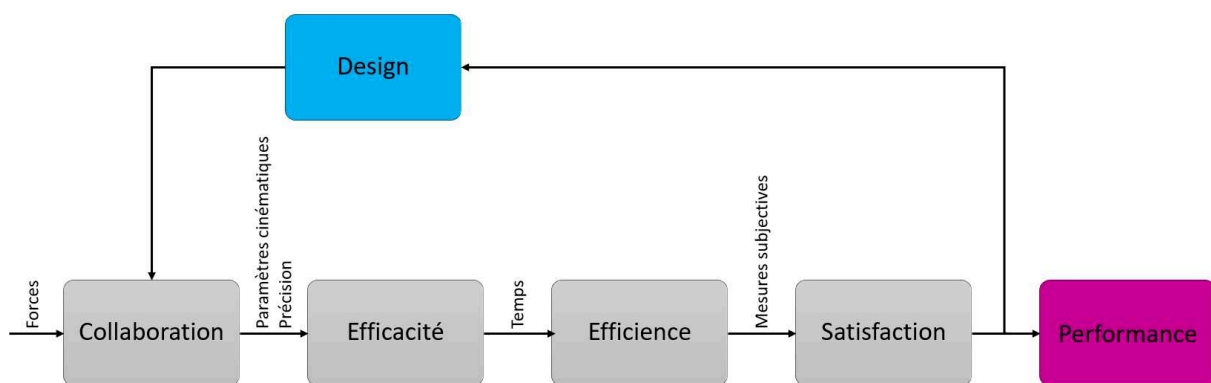


Figure 6 : Modèle d'évaluation HPMM d'une collaboration entre humain et robot (Schmidtler & Bengler, 2015)

Lors d'une collaboration entre l'humain et le robot, des interactions entre les différentes entités sont constamment observables. L'évaluation de leur qualité est nécessaire pour l'évaluation de la collaboration. Leur qualité peut être décrite par la fluidité de l'interaction (Hoffman, 2019).

1.4.2 La fluidité de l'interaction : mesure de leur qualité

Travailler seul ou en collaboration, avec un humain ou un robot, modifie par nature la répartition des sous-tâches pour réaliser l'objectif. En effet, lorsqu'un opérateur travaille individuellement sur un poste de travail, il doit effectuer toutes les sous-tâches lui-même, tandis que dans une situation collaborative, les tâches sont réparties entre les différents travailleurs du poste de manière la plus ergonomique possible pour optimiser la productivité. Ainsi, dans le cadre d'un poste de travail collaboratif, la répartition des tâches nécessite une réflexion en amont pour optimiser le travail de chacun. Cette optimisation peut se penser à partir des temps de travail effectif, ou d'activité des co-travailleurs, mais aussi par la fluidité des interactions entre eux.

La fluidité de l'interaction dépend de facteurs organisationnels, liés à l'humain (e.g., nombre, rôle), au robot (i.e., nombre, capacités techniques) et à l'ergonomie de la situation de travail (e.g., répartition des tâches, plan de travail). D'un point de vue humain, cette fluidité est liée aux sentiments de confiance, d'appréciation et d'acceptation (Hoffman, 2019). Plus l'interaction est fluide, meilleurs sont ces sentiments envers le robot. La programmation du robot et sa coordination définissent son comportement lors des interactions avec l'humain, impactant également l'ergonomie de la situation de travail. La synchronicité entre les différentes entités contribue à la fluidité de l'interaction. Cette synchronicité peut être complétée par une communication verbale, qui peut s'ajouter à la communication non verbale (e.g., regards, gestuelle, contacts, etc.). Cependant, lorsqu'un humain se trouve en collaboration avec un robot, cette communication verbale peut être supprimée, limitant ainsi l'échange d'informations entre les deux. Dans ce cas, le timing des actions de chacun doit être précis et efficient, approprié et dynamique sans que des échanges verbaux ne soient nécessaires (Hoffman, 2019).

1.4.2.1 La fluidité de l'interaction : comment la mesurer ?

Pour introduire un robot collaboratif dans un poste de travail, il est donc nécessaire d'évaluer cette fluidité des interactions. Celle-ci peut s'évaluer subjectivement à partir de la fluidité perçue par l'opérateur (Hoffman, 2019 ; Hoffman & Breazeal, 2010) ou objectivement à partir d'un codage des actions de chacun (Hoffman, 2019 ; Hoffman & Breazal, 2007).

La mesure objective permet d'estimer quantitativement le degré de fluidité lors d'une interaction. Les actions du robot et de l'opérateur humain sont décomposées à travers la dichotomie actif et inactif. L'article de Hoffman en 2019 décrit quatre variables de mesure de la fluidité de l'interaction entre humain et robot à partir des actions des deux co-travailleurs :

- Le temps d'inactivité de l'humain (*Human Idle time*) : pourcentage de temps où l'humain est inactif sur le temps total de la tâche. Cette variable est liée à la mesure subjective de l'ennui, mais aussi du temps perdu ou à l'asymétrie entre les co-travailleurs de la collaboration ;
- Le temps d'inactivité du robot (*Robot Idle time*) : pourcentage de temps où le robot est inactif sur le temps total de la tâche. Ce temps d'attente est souvent présent lorsqu'il attend soit une commande de l'humain soit la fin de son action. Il faut toutefois

différencier une inactivité physique du robot (i.e., il ne bouge pas mais peut traiter des actions comme les mouvements de l'humain ou le moment où il doit agir) avec une inactivité du robot (i.e., il n'effectue aucune action). Une grande inactivité du robot peut être liée à une utilisation inefficace des ressources du robot ou à un problème de coordination entre le robot et l'humain ;

- Le temps d'activité concomitante entre les deux co-travailleurs (*Concurrent Activity*) : pourcentage de temps où les deux co-travailleurs sont actifs simultanément. Cette mesure est en lien avec une bonne synchronisation du système et un partage équitable des tâches ;
- Le délai fonctionnel (*Functional Delay*) : pourcentage de temps où un co-travailleur finit son action tandis que l'autre débute son geste suivant. Cette mesure peut être soit pour l'humain soit pour le robot soit en additionnant les deux pour obtenir le délai fonctionnel de la collaboration. Lorsque cette valeur est négative, cela signifie qu'il y a une superposition des actions des deux co-travailleurs. Ainsi, un faible délai indique une bonne fluidité de l'interaction avec une bonne utilisation des temps d'action de chacun.

La Figure 7 montre un exemple d'une évaluation objective de la fluidité de l'interaction. Les moments d'action de l'humain sont représentés en bleu dans la Figure 7 tandis que ceux du robot sont représentés en rouge. Dans la partie inférieure de la Figure 7, les moments d'attente de l'humain (H-IDLE) et du robot (R-IDLE) correspondent au moment où les deux co-travailleurs sont inactifs respectivement. F-DEL représente le délai fonctionnel, et correspond au moment où les deux sont inactifs, ce sont les moments de transition entre l'activité de l'humain et le démarrage de celle du robot, après la fin de l'action de l'humain. C-ACT correspond à l'activité concomitante des deux co-travailleurs, lorsque les deux sont actifs simultanément. Ce graphique permet donc de décrire visuellement la fluidité des interactions entre l'humain et le robot dans la situation choisie. Il est également possible de ne s'intéresser qu'à une partie de ces quatre variables (grisées dans la Figure 7) pour évaluer la fluidité de l'interaction (Baraglia et al., 2016 ; Nikolaidis & Shah, 2013).

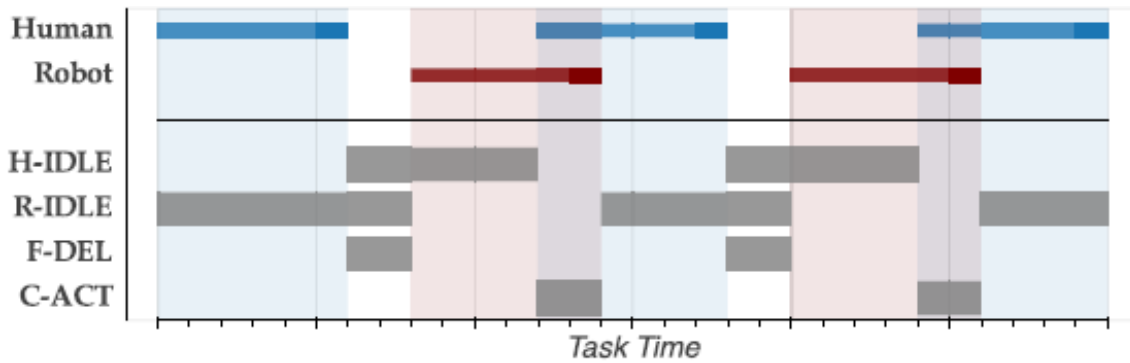


Figure 7 : Exemple d'une mesure objective de la fluidité de l'interaction (Hoffman, 2019). H-IDLE = Human Idle ; R-IDLE = Robot Idle ; F-DEL = Fonctionnal Delay ; C-ACT = Concurrent Activity.

Les mesures subjectives s'intéressent à la perception de la fluidité et des qualités du robot. L'humain évalue la fluidité entre le robot et lui à partir de plusieurs items avec des échelles, regroupés en six catégories : la contribution du robot ; la confiance envers le robot ; les traits positifs du coéquipier robot ; les améliorations au cours des tâches ; l'alliance humain-robot ; des mesures individuelles⁷ (Hoffman, 2019).

Il a été observé qu'il n'existe pas forcément de corrélation entre les mesures subjectives et objectives (Hoffman, 2019 ; Shah et al., 2011), c'est pourquoi nous nous intéressons uniquement aux mesures objectives dans ce travail de thèse.

1.4.2.2 La coordination des co-travailleurs

Lors d'une tâche collaborative entre humain(s) et robot(s), une coordination des sous-tâches entre les différents co-travailleurs est nécessaire pour le bon fonctionnement de la tâche. Les actions doivent être définies au préalable, notamment pour le cobot qui nécessite une programmation pour effectuer ses différentes actions. L'humain, quant à lui, peut plus facilement et rapidement grâce à ses capacités de perception et d'adaptation (Hentout et al., 2019). Cependant, le comportement du robot, doit être prédéfini, vis-à-vis des actions de son co-travailleur humain pour s'adapter à ses mouvements, pour travailler de manière optimale avec une coordination efficace.

⁷ "Human-robot fluency; robot relative contribution; trust in robot; positive teammate traits; improvement; working alliance for Human-robot teams; individual measures".

Dans une situation collaborative, il existe trois comportements de coordination des co-travailleurs, leur permettant de s'adapter aux différentes contraintes de la tâche. La coordination peut être pro-active, réactive ou alternative (Huang et al., 2015).

Tout d'abord, lorsque la coordination d'un travailleur est pro-active, celui-ci n'attend pas la fin des actions de son co-travailleur pour effectuer les siennes. Le travailleur prend donc une position de leader dans les interactions (Iqbal & Riek, 2014). Avec une telle coordination, l'objectif est de minimiser le temps d'inactivité du co-travailleur, mais aussi de maximiser le temps d'activité concomitante. Pour qu'un cobot ait une coordination pro-active, il doit être équipé de capteurs sensoriels lui permettant d'observer puis d'analyser le comportement de son co-travailleur pour anticiper la fin de l'action de celui-ci. Dans l'exemple de l'article de Hoffman en 2019 (Figure 7), l'humain a une coordination pro-active puisqu'il débute sa sous-tâche avant la fin de celle du robot.

Ensuite, la coordination peut être réactive. Le travailleur attend la fin de l'action de son co-travailleur pour effectuer la sienne, il s'adapte au rythme de celui-ci, prenant ainsi un rôle de suiveur (Iqbal & Riek, 2014). Les interactions entre les deux co-travailleurs sont ainsi asynchrones. Tout comme pour la coordination pro-active, le cobot peut également comprendre les actions de son collègue pour débiter les siennes à la fin de celles-ci. Sinon, il peut attendre que l'opérateur humain l'informe que c'est son tour si ce dernier utilise une interface pour donner la commande au robot. Dans l'exemple précédent (Hoffman, 2019, Figure 7), c'est le robot qui possède une coordination réactive, il débute son action avec du retard par rapport à la fin de celle de l'humain.

Enfin, la coordination du travailleur peut être adaptative. Ses actions peuvent débiter avant la fin des actions du co-travailleur ou après. Cette coordination est un mélange entre les coordinations pro-active et réactive. Pour un cobot, un algorithme est nécessaire pour qu'il s'adapte au rythme de travail. Il faut au préalable évaluer les actions lors de la collaboration à partir de celles entre deux humains, puis le comportement d'un des humains est remplacé par le cobot et son comportement est transmis au cobot par le biais de l'algorithme. Avec cette coordination, le cobot peut être le meneur de la cadence de production, ne prenant pas en compte les actions du co-travailleur humain. L'humain s'adapte plus facilement aux actions de l'autre que le cobot. En effet, il possède déjà les capacités à synchroniser deux mouvements qu'il effectue lui-même notamment par l'aire motrice supplémentaire mais aussi les cortex moteur

et sensitif primaires, le cortex prémoteur et le cortex moteur cingulaire (Debaere et al., 2001 ; Donchin et al., 1998 ; Swinnen, 2002). Grâce aux boucles perceptions-actions, avec de l'entraînement, donc de la répétition, l'humain est capable de synchroniser ses gestes à ceux de l'autre (Richardson et al., 2007 ; Schmidt et al., 1998). Dans ce contexte, ses actions ne sont plus planifiées en termes proximaux (i.e., quel mouvement effectuer), mais en termes d'effets qui souhaitent être obtenus : tel mouvement à tel moment (Prinz, 1997). Sebanz et Knoblich (2009) ont décrit la prédiction des actions communes en trois aspects principaux : quoi, quand et où. Le « quoi » correspond à l'action à effectuer selon les intentions de l'autre pour l'action commune, le « quand » au moment où l'action doit être effectuée et est critique pour la coordination temporelle et le « où » à l'endroit de l'action et à la manière de la réaliser, ce qui est nécessaire à la coordination spatiale.

1.4.2.3 La coordination pro-active optimale pour la fluidité de l'interaction

Comme dit précédemment, le délai fonctionnel (i.e., le délai entre la fin de l'action d'un travailleur et le début de l'action de l'autre) est un bon indicateur de la qualité de la fluidité de l'interaction (Hoffman, 2019). Ainsi, un faible délai indique une bonne fluidité de l'interaction avec une bonne utilisation des temps d'action de chacun. Pour réduire ce délai fonctionnel, et donc avoir une fluidité optimale, le travailleur doit avoir une coordination pro-active. En effet, le temps pour accomplir une tâche est inférieur lors d'une coordination pro-active en comparaison aux deux autres coordinations (Huang et al., 2015). En plus d'un travail plus efficient, les temps d'attente du robot mais aussi de l'humain sont moins importants, avec une activité concomitante entre les deux plus importantes (Huang et al., 2015). Ces résultats s'observent également lors d'une interaction humain-humain (Hoffman & Breazal, 2007).

1.5 Les performances du travailleur

Lors des interactions entre l'humain et le robot, des performances individuelles et collaboratives peuvent être observées. Récemment, les performances du travailleur ont été décrites selon trois dimensions : la sécurité, l'ergonomie physique et la productivité (De Simone et al., 2022).

1.5.1 La sécurité

La présence d'un cobot dans une situation collaborative permet un travail avec une proximité physique entre l'opérateur humain et le cobot. Ainsi, un risque de collision est présent en raison de cette proximité. Différentes normes permettent de diminuer voire de supprimer ces risques pour une collaboration sans danger pour l'opérateur (cf., 1.3.3 La sécurité du travailleur dans les interactions).

L'aspect sécurité dans les HRI étant traité dans d'autres axes du projet C-SHIFT, nous ne nous y intéressons pas dans ce travail de thèse.

1.5.2 L'ergonomie

L'ergonomie peut se décomposer en plusieurs types : l'ergonomie physique, l'ergonomie cognitive et l'ergonomie organisationnelle (De Simone et al., 2022 ; Gualtieri et al., 2020). Tout d'abord, l'ergonomie physique cherche à améliorer les gestes et les postures de l'opérateur en optimisant son poste de travail (e.g., plan de travail, distribution des tâches, matériel). Ensuite, l'ergonomie cognitive se penche sur l'optimisation des conditions de travail sur le poste de l'opérateur sur le plan cognitif, le stress ou la fatigue. Enfin, l'ergonomie organisationnelle ne se penche pas que sur le poste de travail de l'opérateur, mais sur l'organisation des tâches, de l'emploi du temps ou des différents postes de travail.

Ainsi, la modification ou l'amélioration d'un poste de travail nécessite une réflexion ergonomique sur la santé physique mais aussi sur mentale de l'opérateur et sur l'organisation de ce poste.

1.5.3 La productivité

Dans le monde industriel, la productivité est généralement considérée comme étant le facteur le plus important en ce qui concerne la compétitivité d'une entreprise (Tangen, 2005) même si de nombreux auteurs pensent qu'elle est reléguée au second rang dans leurs réflexions par les facteurs influençant les processus de production (Singh et al., 2000 ; Tangen, 2005). Cette différence peut s'expliquer par le grand nombre de définitions de la productivité (Tangen,

2005). Nous en retiendrons une, tirée du livre de Hill en 2017, qui définit la productivité comme étant le rapport entre le nombre de sorties (e.g., les produits fabriqués) et les ressources (e.g., matériel, physique, etc.). Cependant il ne faut pas confondre les termes « productivité » et « production ». Ce dernier, pouvant se définir comme la quantité de produits fabriqués, ce qui correspond uniquement au nombre de sorties dans la définition de Hill. Ainsi, la productivité correspond à la production selon les ressources disponibles.

Une autre distinction est importante à faire : celle entre efficacité et efficience. En ce qui concerne l'efficacité, elle correspond au ratio entre les sorties effectives et les sorties attendues, tandis que l'efficience est définie comme le ratio entre la quantité de ressources attendue et la quantité de ressources utilisée (Sink et al., 1989), le temps étant une ressource mesurable.

Dans ce présent travail de thèse, puisque les ressources matérielles restent inchangées tout au long des expérimentations (même nombre de composants disponibles), nous nous intéressons à la production ainsi qu'à son efficacité. Cette production est définie ici comme étant la cadence (le nombre de produits fabriqués pendant un laps de temps) tandis que l'efficacité de production correspond au nombre de produits fabriqués par rapport au nombre attendu.

1.6 Les troubles musculosquelettiques (TMS)

La santé des opérateurs est un des enjeux principaux dans le monde du travail depuis de nombreuses années. Chaque année, l'Assurance Maladie rédige un rapport statistique et financier des risques professionnels en France, dans lequel les sinistres, accidents du travail et maladies professionnelles y sont notamment recensés (L'Assurance Maladie, 2018, 2020, 2021). Dans ce présent travail de thèse, nous expliquons brièvement la partie accident du travail, avant de nous focaliser exclusivement sur la partie maladies professionnelles.

1.6.1 L'accident du travail : la fatigue comme un des facteurs principaux

Les traumatismes, qui font suite à des accidents de travail aigus, créent des absences de plus ou moins longues durées. En France, ces accidents du travail sont renseignés selon quatre critères : l'activité physique spécifique (i.e., l'action au moment de l'accident), la déviation (i.e., le

dysfonctionnement), l'agent matériel (i.e., l'objet en cause) et les modalités du contact (L'Assurance Maladie, 2020). En 2019, la moitié des accidents du travail ont été causée par une activité de manutention manuelle du travailleur et 28% par des chutes. Cette même année pour mille heures de travail, il y a eu près d'une journée et demi de perdues (L'Assurance Maladie, 2020, p. 95).

Pour éviter ces traumatismes, la réflexion se fait notamment autour des conditions de sécurité du poste de travail, en évitant les collisions possibles entre les machines et les opérateurs, mais aussi avec une prévention et une sensibilisation aux risques de traumatismes.

Ces risques de traumatismes peuvent également être accentués par une fatigue des travailleurs (Cavuoto & Megahed, 2016). La fatigue est définie comme étant une atteinte à la capacité ou au rendement d'une personne (Hernandez et al., 2020). Celle-ci peut être physique et/ou mentale en affectant les fonctions motrices de l'opérateur et en diminuant le contrôle moteur et sa force (Cavuoto & Megahed, 2016). En conséquence, la fatigue des opérateurs engendre une baisse de leurs performances, mais aussi une baisse de leur vigilance et une hausse des erreurs. Ainsi, la fatigue augmente ces risques de blessures (Cavuoto & Megahed, 2016). Celle-ci peut être contrôlée si elle est évaluée. Il existe cinq catégories d'indicateur de la fatigue : l'excitation, la vigilance ou l'attention, le contrôle cognitif, la motivation et le stress (Yung, 2016).

Ainsi, même si notre travail n'a pas d'implication directe en termes d'accident du travail, nous allons travailler avec les notions de ressources attentionnelles et de charges cognitives qui peuvent être indirectement liées à ce risque d'accidents.

1.6.2 Les TMS : le trouble majeur du monde industriel

Au contraire des accidents du travail qui sont des événements aigus, les maladies professionnelles apparaissent avec le temps. La fatigue peut être un des facteurs de l'apparition de troubles musculosquelettiques, maladie professionnelle majeure, à long terme lorsqu'il y a un manque de récupération. Malgré les améliorations ergonomiques dans les usines, ces TMS restent encore nombreux et sont un des enjeux majeurs de cette industrie 4.0 (Hernandez et al., 2020).

Les douleurs et les gênes générées par les TMS créent des problèmes pour les opérateurs, mais aussi pour les entreprises (Aublet-Cuvelier et al., 2010). Pour l'opérateur, ces gênes et douleurs se ressentent pendant les heures de travail, mais aussi pendant sa vie quotidienne. Les TMS peuvent être temporaires s'ils sont détectés puis traités, mais lorsque ce n'est pas le cas, ces troubles peuvent créer des séquelles fonctionnelles parfois irréversibles. Outre ces conséquences physiques, associées à une baisse d'aptitudes au travail, la carrière professionnelle peut être ralentie voire stoppée. L'absence de l'opérateur impacte également l'entreprise. Les salariés, à l'arrêt généralement pour plusieurs mois (L'Assurance Maladie, 2020), doivent être remplacés par de nouveaux, non formés au poste. Lorsque leurs arrêts sont prolongés, voire définitifs, les entreprises perdent des salariés expérimentés. En plus de ces coûts indirects, ces TMS peuvent également engendrer un coût financier direct important pour les entreprises (Uguen et al., 2018). Or, une fois les conséquences de ces TMS apparues, il est généralement trop tard. C'est pourquoi il est nécessaire de les prévenir. Il existe plusieurs méthodes pour évaluer les risques d'apparition de TMS. Différentes méthodes seront décrites dans la suite de ce travail de thèse.

Il existe de nombreuses définitions des TMS. Pour exemple, dans la définition donnée par l'Institut National de Veille Sanitaire, les troubles musculosquelettiques « recouvrent un large ensemble d'affections de l'appareil locomoteur, qui se traduisent principalement par des douleurs et une gêne fonctionnelle plus ou moins importantes, mais souvent quotidiennes » (Uguen et al., 2018, p. 5). Ces affections sont souvent périarticulaires et touchent principalement les muscles, les tendons, les nerfs, les vaisseaux et les cartilages des membres supérieurs et du dos (Aublet-Cuvelier et al., 2010).

Dans son rapport annuel de 2021 sur les risques de la santé, l'Assurance Maladie indique que le nombre de personnes atteintes de TMS en France est en légère hausse ces dernières années (42 535 personnes en 2016 pour 44 492 en 2019)⁸, après avoir diminué entre 2011 et 2016. Les TMS correspondent à la grande majorité des maladies professionnelles, représentant près de 90% d'entre elles.

⁸ Les données de l'année 2020 ne sont pas pris en compte en raison des répercussions sur le travail par la pandémie de Covid-19.

Les TMS touchent plus particulièrement les membres supérieurs (L'Assurance Maladie, 2020). En effet, environ 91% de ceux-ci concernent les articulations de l'épaule (34%), du coude (23%) et du poignet ou de la main (34%). La seconde région la plus touchée est le dos, puisque 7% des TMS rapportés touchent cette partie du corps. Ces données sont représentées dans la Figure 8.

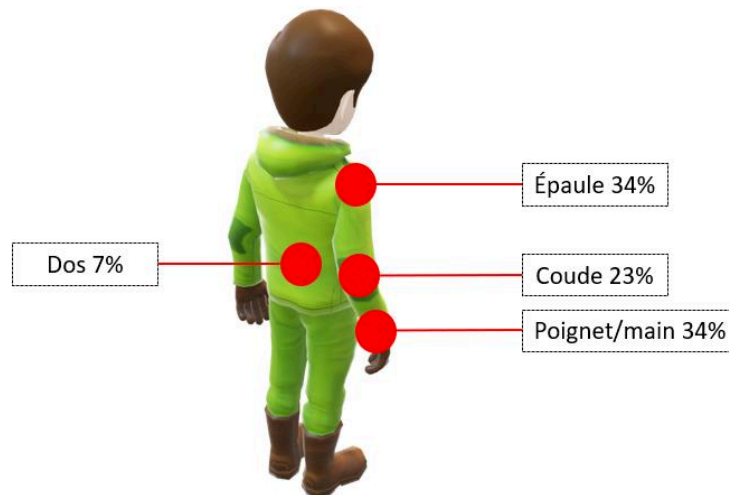


Figure 8 : Zones les plus atteintes par les TMS

Les TMS touchent de manière distincte les différentes catégories de population, en termes de genre et d'âge. Les femmes sont significativement plus atteintes que les hommes. En effet, 55% des TMS touchent les femmes contre 45% pour les hommes (L'Assurance Maladie, 2020). Cette différence peut s'expliquer par des inégalités de conditions de travail (i.e., principalement la nature de la tâche) entre les femmes et les hommes, où chacun est exposé à divers facteurs de risques (Caroly et al., 2013 ; Gollac & Volkoff, 2002 ; Guignon, 2008). De plus, le nombre de nouvelles victimes de TMS augmente avec l'âge, avec environ cinq fois plus de nouvelles victimes à 50 ans qu'à 30 ans (L'Assurance Maladie, 2020).

1.6.3 Les causes multifactorielles d'apparition de TMS

Les TMS sont des pathologies d'origine multifactorielle. Les facteurs principaux sont les sollicitations biomécaniques, la répétitivité, les vibrations, l'exposition à des températures extrêmes et la durée de travail (Caroly et al., 2013). Ainsi, l'environnement de travail, notamment le poste de travail, constitue le facteur principal de risques d'apparition de ces troubles. De nombreux auteurs et instituts répertorient les différents facteurs de risques d'apparition de troubles musculosquelettiques. En 2008, Guignon a identifié neuf expositions

du travail comme étant à risque dans son indicateur : le travail répétitif à cadence élevée, la manutention manuelle de charges, le travail avec contraintes visuelles, le travail au froid, le travail bras en l'air, le travail dans une autre position pénible, l'utilisation d'outils vibrants, une forte demande psychologique et un faible soutien social. Si un travailleur cumulait au minimum deux de ces expositions, il serait considéré comme étant dans une situation à fort risques de TMS (Caroly et al., 2013 ; Guignon, 2008).

Plus récemment, l'INRS a mis en lien les différentes dimensions de l'environnement de travail pour expliquer l'apparition des TMS, avec un modèle dynamique (Figure 9).

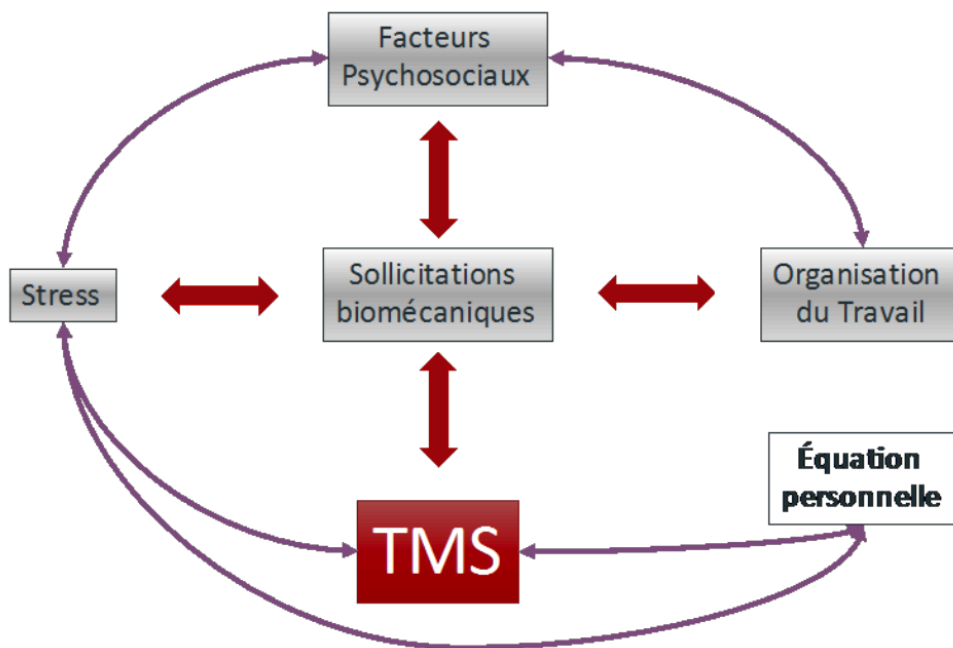


Figure 9 : Modèle dynamique des TMS par l'INRS (Uguen et al., 2018)

Ce modèle met en relation les facteurs psychosociaux, le stress, l'organisation du travail et les sollicitations biomécaniques. De plus, une équation personnelle, qui inclut les caractéristiques individuelles d'une personne, est ajoutée dans celui-ci, pour rendre compte du fait que tout le monde est différent face aux TMS (Guignon, 2008 ; L'Assurance Maladie, 2020 ; Uguen et al., 2018). L'équation personnelle peut prendre plusieurs paramètres en compte : l'expérience du travailleur, son genre, ses paramètres anthropométriques, mais aussi son état de santé.

Les aspects biomécaniques correspondent à la partie centrale et fondamentale de ce modèle, bien que les autres aspects jouent un rôle important dans l'apparition des TMS. Une mauvaise posture imposée par la tâche ou l'environnement (e.g., forte abduction du membre supérieur, flexion ou extension de la nuque), qui peut être jugée comme difficile pour l'opérateur, ainsi

que la répétitivité d'une même tâche et les forces excessives exercées par le travailleur (charges supérieures à 10kg pour les femmes et 20kg pour les hommes) sont les causes principales de l'apparition des TMS (Bernard & Putz-Anderson, 1997 ; Hayes et al., 2009 ; Petit et al., 2014). Il a également été montré dans la littérature que la variabilité motrice pour effectuer une tâche répétitive aurait une influence sur la fatigue et les TMS. Une faible variabilité dans les mouvements engendre une fatigue musculaire et des douleurs, et à long terme des TMS (Madeleine, 2010 ; Srinivasan & Mathiassen, 2012). L'utilisation des redondances des degrés de liberté et des muscles permet cette variabilité et par conséquent d'éviter les répercussions sur la santé du travailleur (Madeleine & Farina, 2008).

Les sollicitations biomécaniques constituent un facteur principal de l'apparition des TMS (Uguen et al., 2018), cependant les autres facteurs ont également un rôle prépondérant. En effet, une forte charge mentale, une forte demande psychologique, en lien avec une faible latitude de décisions sont des éléments de causalités présents chez des personnes souffrant de TMS (Bongers et al., 2006 ; Habibi et al., 2015 ; Josephson et al., 1997 ; Larsman & Hanse, 2009 ; Petit et al., 2014). L'étude de Bao et collaborateurs (2016) s'est intéressée aux relations entre différents facteurs de l'organisation du travail (i.e., rotation de travail, heures de travail supplémentaires et cadence de travail) à partir de données sur 1834 participants. Les auteurs ont conclu que les rotations de postes de travail ne semblaient pas être efficaces pour réduire les contraintes biomécaniques et que travailler plus d'heures augmentait ces contraintes, rendant les opérateurs plus à risques de développer des TMS.

Les contraintes biomécaniques subies par l'opérateur peuvent être mesurées de manière objective en évaluant la posture de l'opérateur. Ces mesures permettent de quantifier les sollicitations biomécaniques de la tâche et de l'environnement sur l'opérateur mais aussi sur ses différentes articulations. Ces méthodes d'évaluation seront développées dans la suite de ce travail de thèse.

2 POSTURE DE L'OPERATEUR : UN ÊTRE HUMAIN EN MOUVEMENT DANS SON ENVIRONNEMENT

L'être humain, qu'il soit couché, assis ou debout, est dans une position qui peut se définir à travers les positions articulaires de son corps. Lorsqu'il est en mouvement, ses segments corporels bougent les uns par rapport aux autres, mais aussi par rapport à l'environnement. Il existe trois types de mouvements : involontaire, volontaire et automatique (Shibasaki, 2012). Le mouvement involontaire n'est pas traité dans ce travail de thèse car il correspond en grande majorité à des mouvements considérés comme pathologiques liés à une lésion ou à un dysfonctionnement des noyaux gris centraux. En effet, ces mouvements sont principalement des tremblements, des dystonies ou des myoclonies. Dans ce présent travail de thèse, nous allons nous intéresser aux mouvements volontaires et automatisés. Ces mouvements peuvent être temporellement décomposés en trois étapes : la planification, la programmation et l'exécution.

« Le comportement moteur est conçu comme un phénomène émergent d'un réseau de contraintes, liées soit à la tâche, soit à l'organisme, soit à l'environnement » (Newell, 1986). Le contrôle moteur peut se définir comme étant les opérations qui observent le déroulement de l'action, mais aussi qui comparent le produit de l'action avec le but visé (Laurent, 1987). Ainsi, le contrôle moteur humain est un processus qui implique le cerveau, les muscles, les membres et les objets externes pour réguler les mouvements humains (Rosenbaum, 2009). Le contrôle moteur a un rôle double : surveiller et intervenir (Danion & Marin, 2016). Le contrôle moteur permet donc de diriger les segments corporels dans le but d'effectuer un mouvement volontaire, influençant le comportement moteur.

L'analyse et la compréhension de ce comportement peut permettre de développer des systèmes portables personnalisés, comme des exosquelettes ou des interfaces de rétroaction, pour guider vers des postures ergonomiques correctes (W. Kim et al., 2018) ainsi que réduire la charge de travail (de Looze et al., 2016). Les systèmes cobotiques ont également été conçus pour réduire la charge de travail physique des opérateurs, mais la question des répercussions sur le comportement moteur des opérateurs n'a pas encore été pleinement analysée.

Dans ce chapitre, nous allons commencer par décrire ce que sont les neurosciences et la biomécanique, puis comment un mouvement est généré et comment celui-ci est contrôlé. Par la suite, nous allons parler de l'apprentissage d'un geste qui mène à son automatisation.

2.1 Le comportement moteur : entre neurosciences et biomécanique

La biomécanique et les neurosciences du mouvement humain permettent de comprendre les bases du contrôle moteur humain (Figure 10). La biomécanique étudie le système musculosquelettique pour l'évaluation des mouvements tandis que les neurosciences étudient la façon dont le système neuronal agit en générant les mouvements (Caporaso et al., 2020).

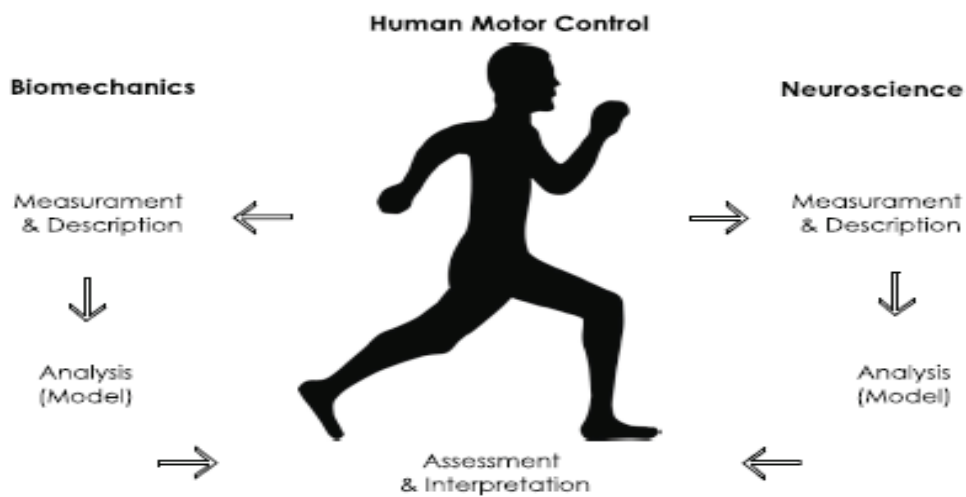


Figure 10 : Description du comportement moteur (Caporaso et al., 2020)

Dans ce présent travail de thèse, nous allons nous intéresser principalement à la biomécanique du mouvement humain en l'étudiant dans les trois plans de l'espace. Cependant, la biomécanique et les neurosciences sont liées. En effet, la biomécanique permet de décrire les mouvements qui sont générés par les différentes parties du corps, tandis que les neurosciences analysent comment ces mouvements sont activés.

2.1.1 Approche neuroscientifique du mouvement humain

Les neurosciences permettent de comprendre le rôle du système neuronal qui génère les actions motrices. Ce domaine d'étude porte son intérêt pour le système nerveux, générateur d'un mouvement, jusqu'aux muscles, effecteurs de ces mouvements. La réalisation d'un mouvement

volontaire, même simple, est en réalité très complexe au niveau cortical en raison des différentes étapes et nombreuses structures impliquées (Shibasaki, 2012). Comme dit précédemment, la commande cérébrale d'un mouvement se décompose en trois étapes que sont la planification, la programmation et l'exécution.

Avant tout mouvement, les informations sensorielles, proprioceptives et extéroceptives sont intégrées pour connaître son environnement et sa posture par rapport à celui-ci. Ces informations sont traitées par les aires associatives et le cortex pariétal postérieur, puis l'intention d'agir, contrôlée par le thalamus et le système limbique, et la prise de décision, s'effectuent au niveau du cortex préfrontal. La planification du mouvement, par le choix de ses différents paramètres, se déroule dans les aires du lobe frontal énoncées précédemment. Ces informations sont transmises à l'aire prémotrice et à l'aire motrice supplémentaire (les deux formant l'aire motrice secondaire) qui programment alors le mouvement en ordonnant les muscles impliqués dans la réalisation du mouvement. C'est ensuite l'aire motrice primaire qui permet l'exécution du mouvement, en transmettant un message nerveux électrique par des neurones descendants au niveau de la moelle épinière. C'est à cet endroit que l'information est transmise à des motoneurones alpha qui innervent les muscles pour effectuer la contraction appropriée au mouvement souhaité. Il est à noter que les ganglions de la base permettent un mouvement plus précis tandis que le cervelet a un rôle dans la coordination et l'harmonisation du mouvement volontaire. La commande d'un mouvement est contralatérale. En fait, pour un mouvement de la main droite par exemple, la commande motrice se fait au niveau de l'hémisphère gauche du cerveau. De plus, au niveau du cortex moteur, chaque partie du corps a une zone dédiée. La taille de la zone ne dépend pas de la taille réelle de la partie du corps, mais plutôt de la complexité motrice de celle-ci.

En raison du nombre important de muscles, la commande motrice se fait à partir de synergies. Les modèles des synergies condensent les informations électriques de plusieurs muscles pour former des synergies musculaires. Elles sont des groupes de muscles activés conjointement par un seul signal central (Latash et al., 2007). Les mouvements complexes peuvent ainsi être réalisés par les synergies musculaires, leur séquençage et leur superposition (d'Avella et al., 2011).

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la résultante de ces différentes étapes, c'est-à-dire à la posture et aux mouvements étudiés dans l'espace par la biomécanique, principalement à partir des positions de certaines articulations.

2.1.2 Approche biomécanique du mouvement humain

La biomécanique permet de mesurer les propriétés mécaniques des organismes vivants, dont l'être humain. L'analyse biomécanique des mouvements humains se fait principalement par des mesures cinématiques, mais peut également être couplée à des mesures cinétiques pour évaluer les mouvements du corps humain en entier (Caporaso et al., 2020). Les différents outils de mesure sont décrits par la suite dans ce travail de thèse (cf., 2.4 Mesures du comportement moteur). En biomécanique, les modèles des squelettes humains impliquent des segments rigides du corps qui sont reliés entre eux par des articulations sans friction entre elles (Caporaso et al., 2017).

La posture du membre supérieur, définie par les angles des articulations, et la force applicable sont liées (Jain et al., 2019; Roman-Liu & Tokarski, 2005). Par exemple, une posture du membre supérieure avec une flexion d'épaule de 45°, une flexion d'épaule de 90° et des positions neutres du poignet et de l'avant-bras permettent une production de force optimale (Jain et al., 2019). Dans ces positions, la longueur du muscle est optimale pour la production de force. A l'inverse, lorsque la posture s'éloigne de la longueur optimale, les muscles ou les tendons sont contractés ou étirés, la quantité de force décroît en raison de la longueur non optimale du muscle, nécessitant une énergie supplémentaire pour compenser la perte de force (Santos et al., 2016). Ces postures sont considérées comme inconfortables pour la réalisation des gestes, et peuvent présenter des risques à long terme pour un travailleur qui reste longtemps dans ces postures.

Le corps humain peut être simplifié en six grandes parties qui sont le tronc, la tête, les deux membres supérieurs et les deux membres inférieurs (Figure 11A). Outre la décomposition du corps en six grandes parties, celui-ci est constitué de nombreux segments qui peuvent se mouvoir dans l'espace environnemental. Ces segments sont généralement définis entre deux articulations et se composent d'un ou de plusieurs os. Les muscles du corps humain permettent

la mobilisation des segments par leurs contractions générées grâce au système nerveux central (SNC).

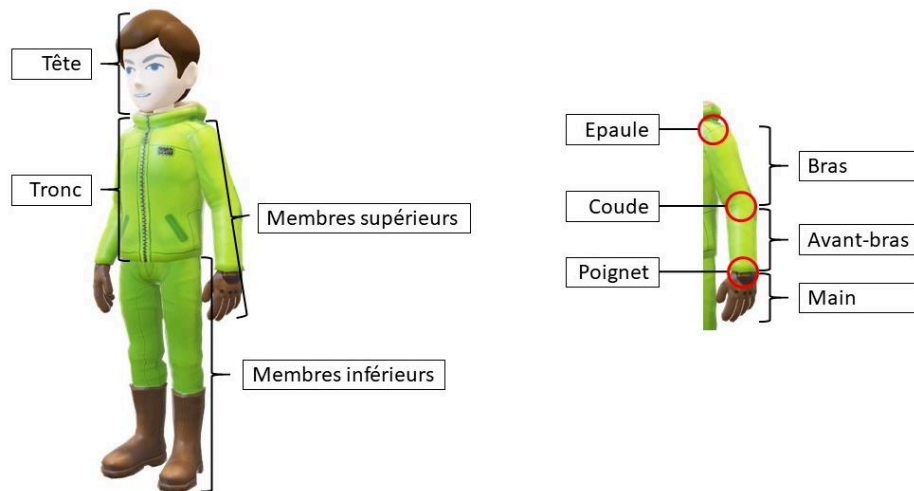


Figure 11 : A/ Corps humain simplifié en six parties. B/ Articulations et segments du membre supérieur

Le membre supérieur débute au niveau de l'articulation de l'épaule (partie proximale) et se termine au niveau du bout des doigts (partie distale). Du plus proximal au plus distal (Figure 11B), il se compose du bras, de l'avant-bras et de la main (Boutet, 2008). Les mouvements du membre supérieur sont très complexes. En effet, il propose plusieurs degrés de libertés en raison des trois articulations principales qui le composent (Bi et al., 2019 ; Boutet, 2008) ; nous négligeons les articulations présentes au niveau de la main. Ainsi, les trois articulations étudiées dans ce travail de thèse sont, de la plus proximale à la plus distale, l'épaule, le coude et le poignet. Le tronc est la partie centrale du corps humain ; il se situe entre les deux membres inférieurs au niveau du bassin, les deux membres supérieurs au niveau des épaules et la tête au niveau de la nuque. Les mouvements du tronc sont généralement associés à ceux de la colonne vertébrale qui se décompose en plusieurs régions : cervicale (7 vertèbres), thoracique (12 vertèbres), lombaire (5 vertèbres) et sacrée (5 vertèbres fusionnées pour le sacrum et 3 à 5 vertèbres fusionnées pour le coccyx). La tête est le segment le plus crânial du corps humain, dans la position de référence anatomique. Ses mouvements s'effectuent au niveau de la nuque. Dans ce travail de thèse, nous ne portons pas d'attention aux membres inférieurs car nous nous plaçons dans une situation de travail collaboratif, en station debout sans déplacement de la part des participants. Ainsi, nous allons nous intéresser au tronc, à la tête et aux membres supérieurs de l'humain dans sa tâche de travail.

2.2 Le contrôle moteur : boucle ouverte et boucle fermée

Dans le cas de mouvements volontaires, régis par une intention, le contrôle moteur est un système de contrôle du mouvement qui commande l'interaction entre l'humain, son environnement et sa tâche (Kerlirzin et al., 2009). A partir des informations sensorielles multimodales récupérées, intégrées et traitées, la commande motrice sélectionne les muscles pour le geste et contrôle son déroulement mais aussi les ajustements posturaux associés. Par conséquent, le contrôle moteur met en relation l'acte moteur effectué et l'acte moteur souhaité ; il a pour rôle de contrôler notre posture et nos mouvements.

Le contrôle moteur s'effectue en boucle ouverte (Figure 12A) et en boucle fermée (Figure 12B). Pour ces deux types de contrôle, dès l'initiation du geste, de nombreux signaux proprioceptifs sont générés (visuels, proprioceptifs, haptiques, ou autres). Ce sont leur utilisation qui différencie les deux modes de contrôle. En effet, lors d'un contrôle en boucle fermée, ces informations sont prises en compte pour corriger le geste quelle que soit la perturbation. Au contraire, lors d'un contrôle en boucle ouverte, ces informations ne sont pas utilisées pour corriger le geste lorsque la perturbation est externe (Danion & Marin, 2016).

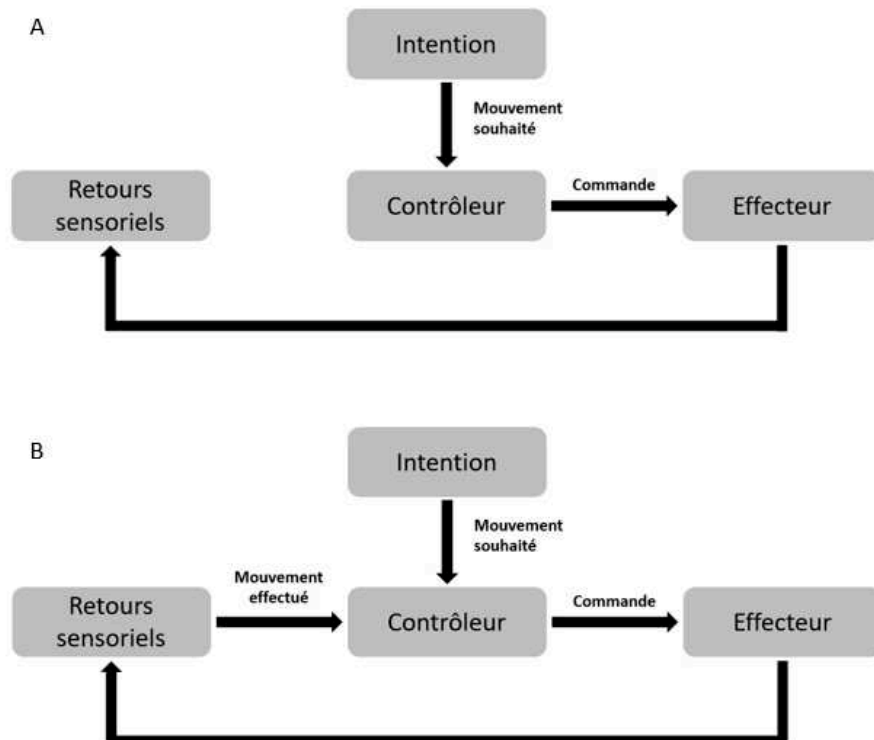


Figure 12 : Contrôle moteur en A/ boucle ouverte et B/ boucle fermée

2.2.1 Contrôle en boucle ouverte

Chaque mouvement volontaire entraîne des retours sensoriels. Ainsi, ces informations sont disponibles (sauf en cas de déafférentations). C'est le système qui décide de ne pas s'en servir, notamment lorsqu'il n'a pas le temps d'avoir accès à ces informations pour corriger son mouvement. Le contrôle en boucle ouverte a généralement lieu lors de mouvements balistiques ; avec des générateurs centraux ; grâce à un modèle interne.

Il est admis que pour une tâche sensori-motrice simple (e.g., appuyer sur un bouton quand une lumière s'allume), le temps de réaction est minimum de 150ms (Henry & Rogers, 1960). Ce temps est appelé délai visuo-moteur car l'information visuelle n'a pas le temps d'être traitée puis d'envoyer une réponse motrice adaptée lors d'un mouvement balistique. Ainsi, lorsqu'un mouvement a une durée inférieure à ce délai visuo-moteur, ou qu'une perturbation arrive juste avant la fin du geste, le mouvement ne peut pas être corrigé (Danion & Marin, 2016).

Pour des mouvements plus lents, des générateurs centraux peuvent notamment assurer une activité coordonnée telle que la marche (Brownstone et al., 1992). Un modèle interne peut modifier certains mouvements sans utiliser les retours sensoriels avec notamment les ajustements posturaux anticipés (Vercher et al., 1996).

2.2.2 Contrôle en boucle fermée

Au contraire du contrôle en boucle ouverte, les feedbacks ont un rôle majeur dans le contrôle en boucle fermée. Ce contrôle peut être automatique (i.e., les réflexes) ou volontaire (Danion & Marin, 2016). Le contrôle automatique n'est pas étudié dans ce travail de thèse. Dans le cas du contrôle volontaire, l'intention a un rôle central. Les retours sensoriels (ou *feedbacks*) engendrés sont traités de manière consciente et précise.

Ce mécanisme est possible lors de la réalisation de mouvements lents pour le contrôle volontaire. Lors de la réalisation du geste, les retours sensoriels permettent de corriger le mouvement en comparant la sortie motrice souhaitée et la sortie motrice en cours d'exécution. L'écart entre les deux peut donc être continuellement compensé lors de l'exécution du geste. Tous les sens ont un rôle dans le contrôle moteur, cependant la vision et la proprioception ont généralement un rôle plus important.

2.3 L'apprentissage moteur

Comme expliqué précédemment, le contrôle moteur n'est pas un comportement inné, mais acquis. Ainsi, pour avoir des comportements adaptés et efficaces, il est nécessaire d'apprendre à les réaliser. Dans la littérature actuelle, il existe deux théories principales de l'apprentissage moteur : l'apprentissage moteur en boucle fermée avec la contribution des feedbacks (Adams, 1971) et la théorie des schémas avec une amélioration du programme moteur (R. A. Schmidt, 1975). Ces deux théories sont expliquées ci-dessous.

2.3.1 L'apprentissage moteur en boucle fermée : contribution des feedbacks

Dans un mouvement simple et auto-rythmé, il existe deux propriétés principales qui sont la direction de celui-ci et son étendue. Pour effectuer ce mouvement, l'humain doit disposer de références sur les mouvements passés (proprioceptives ou connaissance des résultats) et les feedbacks actuels (Adams, 1971).

Dans la théorie d'Adams, le contrôle du mouvement se fait en boucle fermée (Adams, 1971). Ainsi, les mouvements sont réalisés en comparant les feedbacks à une référence en mémoire. Cette référence permet de détecter les erreurs, mais aussi de les corriger. Dans cette théorie, Adams distingue deux traces dans la mémoire : la trace mnésique et la trace perceptive. La trace mnésique sélectionne et initie la réponse motrice en générant un programme moteur, considéré comme restreint (Simonet, 1986). Cette trace se forme et se renforce avec tous les essais antérieurs, notamment la connaissance des résultats (i.e., l'information sur l'erreur). La trace perceptive complète les informations de la trace mnésique en guidant le mouvement, en se comparant avec le mouvement en cours. La trace perceptive est la référence qui est comparée avec une valeur actuelle, connue grâce aux feedbacks sensoriels. Cette trace perceptive se renforce par la répétition, donc par l'expérience des stimuli de rétroaction, mais aussi avec la connaissance des résultats. Ainsi, les traces mnésique et perceptive sont complémentaires pour l'exécution d'un mouvement précis, avec la trace mnésique à l'initiation du mouvement et la trace perceptive au contrôle de celui-ci. La théorie d'Adams est représentée dans la Figure 13.

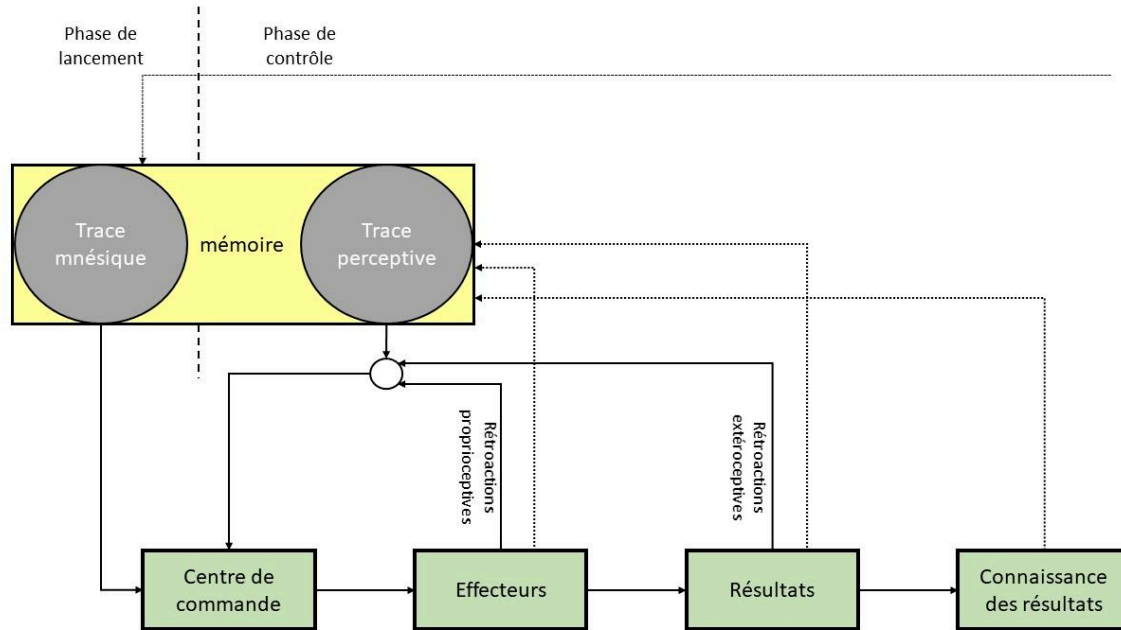


Figure 13 : Schéma de la théorie en boucle fermée d'Adams (Simonet, 1986)

2.3.2 L'apprentissage moteur en boucle ouverte : la théorie des schémas

Le programme moteur est une séquence de commandes stockées qui est « structurée avant le début du mouvement et permet à toute la séquence d'être influencée par la rétroaction périphérique⁹ » (Keele, 1968, p. 387). Pour une classe de mouvement, il existe des programmes moteurs généraux (PMG) qui permettent d'éviter des problèmes de stockage des programmes moteurs.

Lors de l'exécution d'un mouvement, le sujet stocke quatre informations : les conditions initiales (i.e., les informations reçues des récepteurs) ; les spécifications de la réponse pour le PMG avant l'exécution du mouvement ; les conséquences sensorielles de la réponse (i.e., les stimuli de rétroaction du mouvement) et le résultat (i.e., la connaissance du résultat et le renforcement subjectif). Ces informations sont stockées après la production du mouvement. En répétant le même mouvement, la force de la relation entre ces quatre informations augmente, et

⁹ Structured before the movement begins and allows the entire sequence to be carried uninfluenced by peripheral feedback

de manière plus conséquente encore avec une bonne précision de la rétroaction du résultat (R. A. Schmidt, 1975).

Lorsqu'un schéma de réponse est déjà développé, la production de réponse débute par la connaissance du résultat souhaité et des conditions initiales, puis les spécifications de la réponse sont déterminées à partir de la relation entre les résultats et les spécifications des réponses antérieures. La relation entre ces deux informations est appelée le schéma de rappel. Une fois spécifié, le sujet exécute le programme moteur. En plus de générer les spécifications de la réponse motrice, le sujet génère des rétroactions proprioceptives et/ou extéroceptives. Au cours du mouvement et après celui-ci, les conséquences sensorielles attendues sont comparées aux feedbacks. Si un décalage est observé entre les deux, une erreur alimente le schéma de reconnaissance avec les informations de la réponse produite (i.e., le renforcement subjectif). Le sujet doit également avoir connaissance du résultat réel, concernant la justesse du mouvement, pour le comparer avec le résultat attendu. Cette théorie des schémas de Schmidt en 1975 est représentée par la Figure 14.

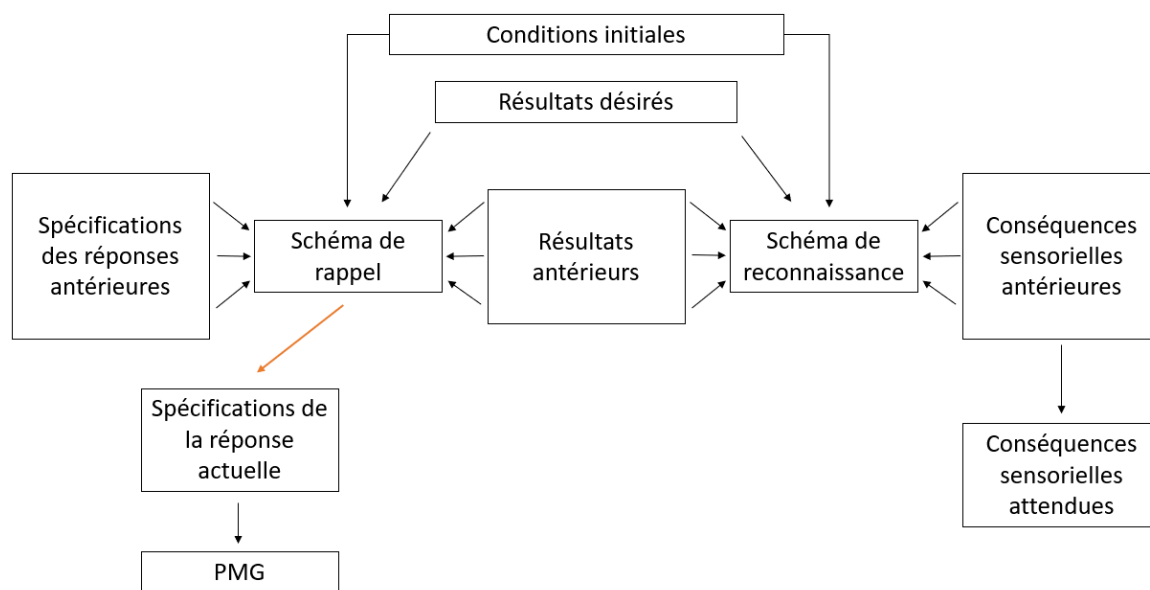


Figure 14 : Description de la théorie des schémas (R. A. Schmidt, 1975)

2.3.3 L'apprentissage : comment influe-t-il sur la variabilité du geste ?

Il est important de distinguer la variabilité de la performance et la variabilité du geste. En effet, une performance est souvent la conséquence de plusieurs gestes, c'est ce qui s'appelle la redondance (Ranganathan & Newell, 2010 ; Roby-Brami et al., 2005). Avec l'apprentissage, la

performance s'améliore et la variabilité de la performance diminue (Muller & Loosch, 1999). En comparant les performances d'un groupe avant apprentissage puis après, il a été observé que la performance était plus importante et plus stable lorsque les individus devenaient experts, comparativement à lorsqu'ils étaient novices. L'apprentissage permet donc d'améliorer les performances, jusqu'à un certain plafond, mais aussi de stabiliser cette performance en réduisant sa variabilité.

L'apprentissage modifie également le comportement neurologique (Milton et al., 2004 ; VanSwearingen & Studenski, 2014). Au niveau central, l'activité cérébrale a lieu au niveau des circuits cortico-basal ganglionnaire et cortico-cérébelleux alors que pour un novice, les activations sont dans des circuits fronto-pariétaux. De plus, les patterns de l'activité cérébrale deviennent efficaces, brefs et spécifiques et l'activité de l'aire motrice cingulaire est réduite. Au niveau périphérique, le mouvement est plus lisse avec un profil de vitesse régulier, les muscles sont activés de manière séquentielle et non plus dans un schéma de co-contractions prolongées. Enfin, la séquence motrice est préprogrammée grâce aux différents feedbacks acquis pendant les différents essais.

Avec l'apprentissage, les performances à la tâche sont plus stables. En revanche, il a été observé que l'apprentissage moteur augmente la variabilité motrice, pour une tâche répétitive d'une faible charge (Madeleine et al., 2008 ; Muller & Loosch, 1999). En fait, avec le temps et surtout la répétition des gestes, à long terme, différentes stratégies motrices se développent pour effectuer le même geste, avec une meilleure utilisation des degrés de liberté qu'offrent le tronc et les membres supérieurs (Muller & Loosch, 1999). L'apprentissage permet d'effectuer des gestes plus précis, plus rapides, avec moins d'effort et d'énergie (Donchin et al., 2003; Milton et al., 2004). La variabilité motrice permise par l'utilisation des redondances motrices réduit la fatigue musculaire ainsi que les douleurs, et à plus long terme les troubles musculosquelettiques (Madeleine, 2010 ; Srinivasan & Mathiassen, 2012). Par conséquent, la variabilité motrice, donc l'apprentissage d'un geste, permet d'éviter des répercussions négatives sur la santé du travailleur (Madeleine & Farina, 2008).

2.4 Mesures du comportement moteur

Le comportement moteur peut se décrire à travers deux domaines : la neuroscience et la biomécanique (Caporaso et al., 2020). Nous allons décrire certains outils de métrologie permettant d'étudier le comportement moteur. Dans ce présent travail de thèse, nous n'étudions pas la partie neuroscientifique du mouvement, cependant les outils d'évaluations sont brièvement expliqués par la suite. Les différents outils permettant d'évaluer la biomécanique des mouvements et la posture sont décrits plus en détails.

2.4.1 L'électromyographie : l'activité électrique du muscle témoin de son activation

L'électromyographie, ou EMG, correspond à l'enregistrement de l'activité électrique des muscles produit lors de leur contraction. Le signal électrique peut être récupéré avec de l'EMG de surface ou intramusculaire, avec des électrodes non-invasives ou invasives (Chowdhury et al., 2013). A l'aide de ces informations, il est possible de s'intéresser au comportement neuromusculaire du corps humain. Lorsqu'un muscle est au repos, l'amplitude du signal électrique est très faible. Dès qu'il est activé, le signal augmente immédiatement. La mesure EMG doit être relative, pour comparer différents individus. Dans ce cas, le signal EMG est normalisé avec la Contraction Volontaire Maximale (MVC ou *Maximal Voluntary Contraction* en anglais) permettant une mesure en pourcentage du signal électrique maximal.

Pour pallier les risques de cross-talk (i.e., interférences avec d'autres signaux), les mesures sont effectuées lors d'une tâche répétitive qui isole au maximum le muscle à mesurer (Chowdhury et al., 2013 ; Solomonow et al., 1994). Ainsi, l'EMG est principalement utilisée pour un geste répétitif de muscles spécifiques. Dans le domaine de l'industrie, cet outil de mesure permet d'analyser les différentes positions sur un plan ergonomique afin d'évaluer entre autres le stress musculosquelettique d'un poste de travail. Ces enregistrements peuvent également décrire les différentes synergies présentes au niveau des articulations.

2.4.2 Les mesures de force : la cinétique

Tandis que la cinématique ne s'intéresse qu'aux mouvements du corps sur les plans temporel et spatial, la cinétique s'intéresse en plus à la masse du déplacement ainsi qu'aux forces mises en jeu lors des mouvements. Les paramètres cinétiques d'un mouvement décrivent la relation entre le mouvement et sa dynamique, notamment les forces. Ces différents paramètres sont liés. En fait, les muscles produisent la force appliquée par le corps.

Pour une description cinétique d'un mouvement, il est nécessaire de mesurer les forces en action sur le corps lors de ce mouvement. Cependant, la cinétique des membres supérieurs est moins étudiée que celle de la marche. En effet, leurs mouvements ne sont pas répétés comme ceux des membres inférieurs dans la marche (Rau et al., 2000) et l'équipement peut gêner dans les mouvements ou dans l'utilisation des mains dans la tâche. Toutefois, certains paramètres cinétiques des membres supérieurs ont été mesurés tels que la force au niveau du poignet avec un dynamomètre (Kwakkel et al., 2019), la force des membres supérieurs pendant une nage avec un ergomètre (Morouço et al., 2015) ou pour de la récupération avec des cellules de charge (Ardestani et al., 2019). Dans ce travail de thèse, nous avons fait le choix d'étudier le comportement moteur par la cinématique.

2.4.3 La motion capture : la cinématique du corps pour décrire les mouvements et postures

La capture du mouvement (ou *motion capture*), correspond à l'enregistrement des mouvements d'un objet ou d'une personne, à haute fréquence, dans un contexte réel en suivant la position des points d'intérêt de l'objet ou de la personne. La motion capture permet donc d'enregistrer le comportement biomécanique de l'humain. Les systèmes de motion capture sont nombreux, chacun présentant des avantages et des inconvénients dans leur utilisation ou dans leur traitement (Field et al., 2011) : acoustiques, mécaniques, magnétiques, optiques et inertiels. Nous ne développerons pas les systèmes acoustiques, mécaniques et magnétiques, étant des systèmes peu utilisés dans la littérature.

Les systèmes optiques sont souvent utilisés et cités dans la littérature (Valevicius et al., 2018 ; Williams et al., 2006). Ces systèmes peuvent être utilisés avec des marqueurs passifs ou actifs : les marqueurs passifs, en réfléchissant une lumière infrarouge, permettent de trianguler leur position (van der Kruk & Reijne, 2018) ; les marqueurs actifs émettent une lumière captée par

les caméras. Les deux systèmes avec marqueurs sont d'une extrême précision, inférieure au millimètre (van der Kruk & Reijne, 2018). Cependant, les données obtenues sont uniquement des positions, nécessitant une ou plusieurs dérivées pour obtenir des données de vitesse ou d'accélération. De plus, en raison d'un matériel conséquent (i.e., caméras, marqueurs) et d'un espace prédéfini, ces outils sont difficilement déplaçables et utilisables dans des environnements écologiques. Ces trois technologies présentent des occlusions, créant un possible manque de données dans les enregistrements.

Les systèmes inertiels de motion capture enregistrent des données d'accélération et de vitesse de rotation à partir d'accéléromètres et de gyroscopes triaxiaux. Certains capteurs sont également équipés de magnétomètres (N. Miller et al., 2004). Chaque capteur doit être placé à un endroit stratégique du corps, prédéfini pour effectuer des mesures (Schepers et al., 2018). Contrairement aux systèmes optiques, pour obtenir les données de position et de vitesse, il faut intégrer les données d'accélération obtenues par les systèmes inertiels, ce qui peut créer une dérive dans les données. Toutefois, cette technologie permet d'enregistrer des données dans des environnements variés, notamment en extérieur ou dans des situations écologiques (e.g., poste de travail dans une usine). De plus, la calibration est rapide et les enregistrements sont d'une grande précision, inférieure à 1°. Dans ce présent travail de thèse, nous utilisons un système inertiel.

2.5 Méthodes d'évaluation des TMS

Nous avons vu précédemment que les TMS correspondent à un problème majeur au niveau industriel et qu'il est nécessaire d'évaluer les risques d'apparition de TMS en amont. Ainsi, depuis la fin du XX^{ème} siècle, l'évaluation des risques de développer des TMS a fait l'objet de nombreuses études avec l'apparition de plusieurs méthodes : RULA (McAtamney & Corlett, 1993), REBA (Hignett & McAtamney, 2000), OCRA (Colombini, 1998), OWAS (Karhu et al., 1981), et d'autres. Les méthodes OWAS et REBA identifient les risques d'apparition de TMS lors de postures statiques tandis que les méthodes OCRA et RULA les identifient lors de mouvements répétitifs (Gómez-Galán et al., 2017). D'autres méthodes, dites indirectes, évaluent de manière subjective ces risques de TMS avec notamment l'équation NIOSH (1981) ou la méthode INSHT (1998). Certaines méthodes d'évaluation sont décrites par la suite. Pour

les évaluations subjectives, seule l'équation NIOSH est présentée, tandis que les méthodes OWAS et RULA sont présentées pour les évaluations objectives.

2.5.1 L'équation NIOSH : limite d'action et limite maximale admissible

Le NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) a publié un guide des pratiques de travail dans lequel deux valeurs limites ont été déterminées pour une tâche de levage manuel (NIOSH, 1981) : la limite d'action (AL ou *Action Limite*) et la limite maximale admissible (MPL ou *Maximal Permissible Action*), qui correspond à trois fois la valeur de l'AL. A partir de ces deux limites (AL et MPL), une tâche de levage manuel peut être décrite selon trois niveaux : le risque nominal lorsque la tâche se situe en dessous de AL ; le risque inacceptable sans contrôles administratif ou technique lorsqu'elle se trouve entre AL et MPL ; le risque inacceptable avec besoin de contrôles techniques quand la tâche est au-dessus de MPL (Genaidy et al., 1993).

L'équation qui permet d'évaluer la tâche a ensuite été revisitée dix ans plus tard par la modification de certains de ses paramètres. Cette équation a été revisitée en s'appuyant sur la répétition des gestes, la force et la posture (Waters et al., 1993), et permet de calculer le poids limite recommandé (*Recommended Weight Lift* ou RWL). Ainsi, elle prend en compte différents facteurs de la tâche et peut être décrite par l'équation $RWL = LC * HM * VM * DM * AM * FM * CM$, avec LC = charge à soulever ; HM = position horizontale de la main ; VM = position verticale de la main ; DM = distance du déplacement ; AM = angle de déplacement ; FM = fréquence de l'action ; CM = présence de poignées ou non.

L'équation NIOSH est une méthode utilisée par les ergonomes pour évaluer une tâche de levage (Potvin, 2014). Cependant, les poids limites recommandés semblent être minimisées (Elfeituri & Taboun, 2002 ; Hidalgo et al., 1995 ; Potvin, 2014) et cette évaluation ne prend en compte que la tâche de levage d'un objet. Cette méthode ne peut donc pas être utilisée pour d'autres tâches répétitives telles que le vissage et semble difficilement applicable à une tâche en usine (Elfeituri & Taboun, 2002). Enfin, les capacités individuelles du travailleur ne sont pas prises en compte avec cette méthode, puisque c'est la tâche qui est évaluée et non ses répercussions sur le travailleur.

2.5.2 La méthode OWAS

La méthode OWAS (*Ovako Working posture Analysing System* ou *Système d'Analyse de posture de Travail d'Ovako*) est un outil d'analyse semi-quantitative. Elle cherche à identifier et à évaluer les postures de travail en s'intéressant au dos, aux membres supérieurs et inférieurs selon les postures, ainsi qu'à la charge à porter (Karhu et al., 1981). Ainsi, pour chaque partie d'intérêt, un score de 1 à 3 est donné pour les membres supérieurs et pour la charge, de 1 à 4 pour le dos et de 1 à 7 pour les membres inférieurs. Ces différents scores sont représentés dans la Figure 15. A partir de ces quatre scores, un code à quatre chiffres est déterminé (dos, membres supérieurs, membres inférieurs, charge) avec deux cent cinquante-deux combinaisons possibles.

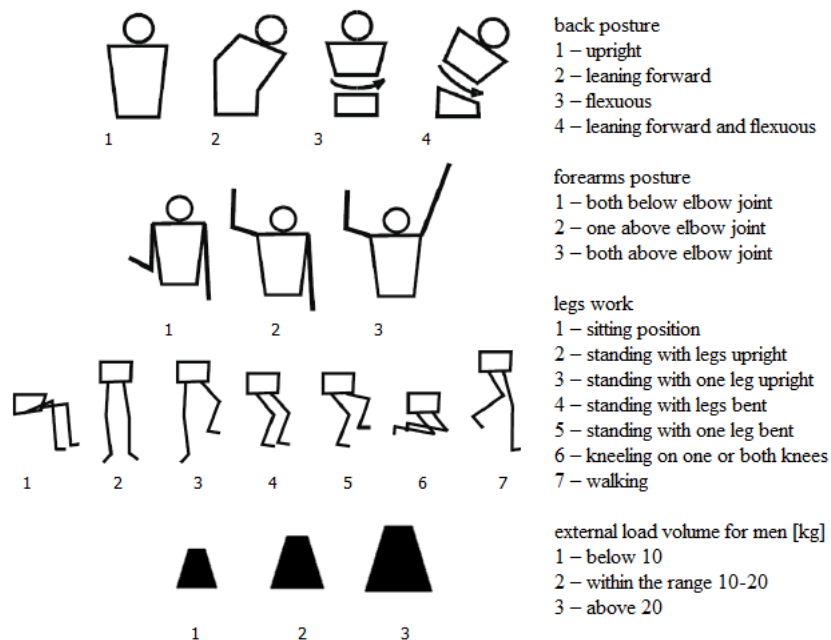


Figure 15 : Codage du dos, des membres supérieurs et inférieurs et de la charge (Grzybowska, 2010)

Cette méthode est simple à utiliser et à mettre en place. Cependant, elle ne s'intéresse pas à toutes les articulations des opérateurs. Par exemple, au niveau des membres supérieurs, le codage ne s'intéresse qu'à la position du membre par rapport à l'épaule, mais ne prend pas en considération les articulations du coude et du poignet. De plus, elle ne prend pas en compte la durée ou la répétition des différentes postures (Takala et al., 2010).

2.5.3 La méthode RULA

La méthode RULA (*Rapid Upper Limb Assessment* ou *Evaluation Rapide des Membres Supérieurs*) a été développée en 1993 par McAtamney et Corlett. Dans cette méthode, le corps

est divisé en deux groupes : les membres supérieurs avec les articulations de l'épaule, du coude et du poignet ; la partie médiale avec la nuque, le tronc et les jambes (Malchaire et al., 2011 ; McAtamney & Corlett, 1993). Pour chacune de ces articulations, un score de posture est calculé selon leur position articulaire. Cette méthode évalue séparément les deux côtés de l'opérateur. Ainsi, il faut prendre en compte un des membres supérieurs, le gauche ou le droit, avec ses trois articulations, et la nuque, le tronc et les jambes (voir Figure 16). Il est donc nécessaire d'effectuer deux évaluations pour analyser complètement le travail de l'opérateur.

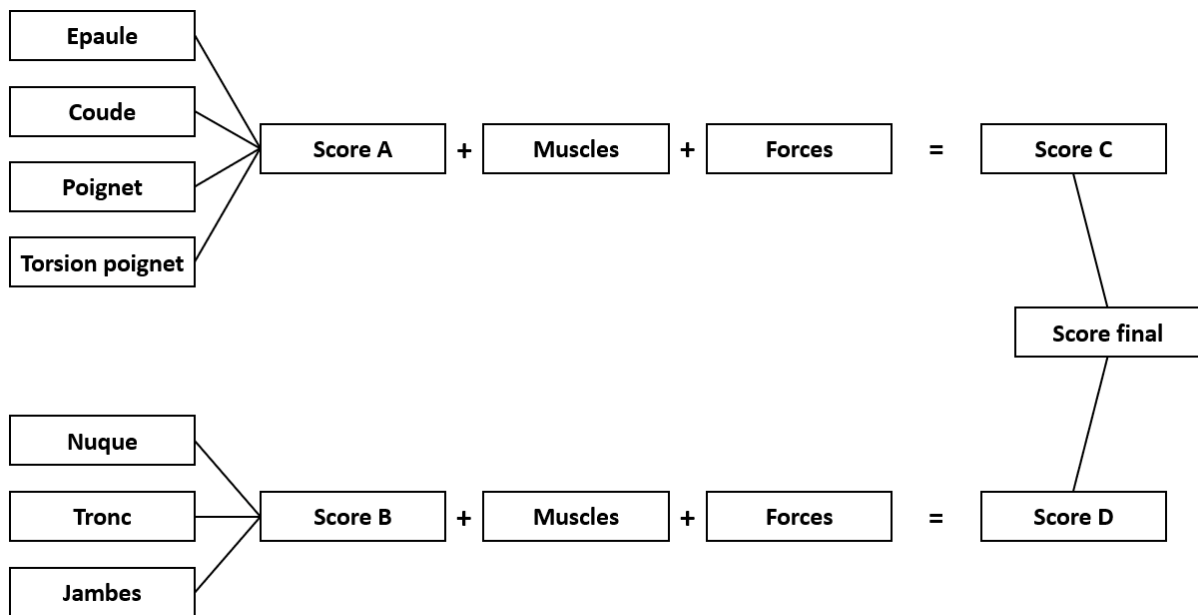


Figure 16 : Les étapes à suivre lors de l'évaluation RULA

L'évaluation RULA s'effectue en trois étapes. La première est de donner un score pour chacune des articulations selon sa position articulaire. Le score 1 est donné lorsque le facteur de risque est minimal, plus le score augmente, plus le facteur de risque augmente également (Figure 17) Ces différentes valeurs se basent sur des études et recommandations préalables pour chaque articulation : l'épaule (Chaffin, 1973 ; Hagberg, 1981 ; Harms-Ringdahl & Schüldt, 1990 ; Herberts et al., 1980 ; Schüldt et al., 1987 ; Tichauer, 1966), le coude et le poignet.

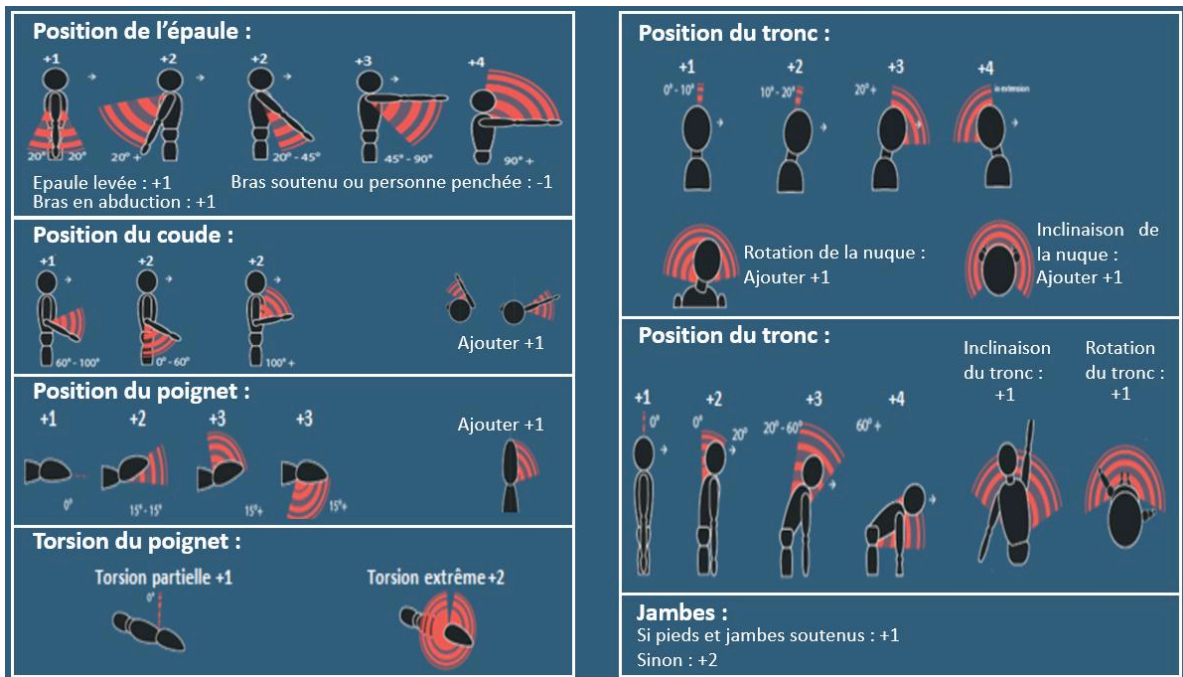


Figure 17 : Grille d'évaluation des positions articulaires pour les scores A et B dans la méthode RULA

Ensuite, à l'aide de deux tables (Figure 18), deux scores, A et B, sont calculés. Le score A correspond à celui du membre supérieur observé tandis que le score B correspond à la partie médiale. Les deux scores sont compris entre 1 et 9, où 1 signifie que la charge musculosquelettique de la posture est la plus faible.

Table A		Poignet							
		1		2		3		4	
Epaule	Coude	Torsion du poignet							
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	6	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Table B		Posture du tronc											
		1		2		3		4		5		6	
Nuque		Jambes											
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7	
2	2	2	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7	
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7	
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8	
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	

Figure 18 : Tables A et B pour obtenir les scores A et B dans la méthode RULA

Ainsi, les scores A et B sont obtenus. Pour obtenir les scores C et D, il faut ajouter 1 si la posture est maintenue statique pendant plus de dix minutes ou si l'action est répétée plus de quatre fois par minute. Selon la charge, il faut ajouter 1 si celle-ci est entre 2kg et 10kg par intermittence ou 2 si celle-ci est répétitive et ajouter 3 si la charge est supérieure à 10kg avec de la répétitivité ou des chocs. Une fois ces scores connus, un score final est obtenu à l'aide de la table C (Figure 19). A partir de ce score final, quatre niveaux de risques sont définis avec l'action à effectuer : niveau 1 où le risque est faible et acceptable pour les scores 1 et 2 (en bleu sur la Figure 19) ; niveau 2 où une investigation est nécessaire avec des changements à venir pour les scores 3 et 4 (en jaune sur la Figure 19) ; niveau 3 où l'investigation et les changements sont nécessaires rapidement pour les scores 5 et 6 (en orange sur la Figure 19) ; niveau 4 où l'investigation et les changements sont nécessaires immédiatement pour le score 7 (en rouge sur la Figure 19).

Table C	Table B						
Table A	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

Figure 19 : Table C pour obtenir le score final dans la méthode RULA

Ce score mesure le niveau de risque d'apparition des TMS à partir des positions articulaires. La méthode RULA s'appuie sur les postures de travail des opérateurs mais ne tient compte ni des tâches de manutention ni de certaines variables telles que la durée de la tâche, les vibrations ou les périodes de récupération (Misslin et al., 2021). De plus, elle n'évalue pas les tâches avec déplacements ou avec de fortes variabilités, et évalue séparément les côtés droit et gauche. Cependant, la méthode RULA est fortement utilisée dans les usines mais aussi dans les recherches scientifiques. En effet, la méthode RULA reste un bon outil pour s'intéresser au risque de développer des TMS, au niveau des membres supérieurs et du tronc, car elle tient compte de la répétition, de la force, de la posture et des efforts statiques de l'opérateur (Aubry, 2006). De plus, cette méthode est simple à utiliser et facile à interpréter (Misslin et al., 2021).

2.5.4 L'évaluation RULA : méthode d'évaluation des risques très répandue

Comme nous venons de le voir, il existe de nombreuses méthodes d'évaluation des risques de TMS. Parmi ces différentes méthodes, une des plus utilisées et des plus citées, tant dans le domaine industriel que dans la recherche (Cardoso et al., 2021 ; Misslin et al., 2021), est la méthode RULA. Elle évalue les postures corporelles de l'opérateur lors d'une tâche répétitive dans le but de prévenir l'apparition de TMS et d'intervenir sur les postes de travail pour améliorer ergonomiquement la posture.

Les mesures de cette évaluation peuvent se faire off-line (i.e., les résultats du score sont connus après les enregistrements), ou on-line (Cardoso et al., 2021). Dans ce deuxième cas, les travailleurs peuvent avoir un retour en temps réel des risques de leur posture. Ces retours en direct permettent aux travailleurs de modifier leurs positions pour se soulager. Vignais et ses collaborateurs (2013) ont comparé la même tâche industrielle avec un groupe qui avait des

feedbacks en direct sur leur score RULA et des articulations fortement sollicitées et un autre groupe sans ces informations. Malgré un temps de travail plus long pour le groupe avec les feedbacks (même s'il n'y a pas de différence pour le travail effectif), le score moyen RULA était plus faible par rapport au groupe contrôle. De plus, sans le retour des informations RULA, les opérateurs passaient plus de temps avec des scores élevés (supérieur à cinq) que les opérateurs qui bénéficiaient de ces informations.

Les mesures off-line permettent d'avoir un retour après le travail de l'opérateur. Au contraire des mesures on-line, l'opérateur ne peut pas modifier sa posture en même temps qu'il réalise son travail. Sa production n'est pas affectée par les informations supplémentaires obtenues avec les mesures on-line qui modifient son comportement. De plus, les mesures off-line sont plus répandues dans la littérature (Cardoso et al., 2021) en raison de leur intérêt pour étudier la posture, et non la modifier en temps réel (mesures on-line). Ainsi, dans ce travail de thèse, nous utilisons des mesures off-line de la posture avec des évaluations RULA.

3 ATTENTION VISUELLE ET CHARGE COGNITIVE : DES RESSOURCES LIMITÉES DANS L'ACCOMPLISSEMENT DES TÂCHES

Pour agir sur son environnement et interagir avec lui, l'humain doit percevoir ce qui l'entoure et traiter des informations dans le but d'effectuer ses différentes actions dans celui-ci. Lorsqu'un opérateur est placé dans une situation de travail, il doit avoir connaissance de son environnement dans le but de performer de manière optimale dans la réalisation de sa ou ses tâches. Dans ce travail de thèse, nous nous penchons principalement sur la charge cognitive de l'opérateur ainsi que sur son attention visuelle. Ainsi, dans ce chapitre de thèse, nous allons débiter en définissant ce qu'est la charge cognitive et en décrivant comment la mesurer dans un contexte de double tâche, puis nous allons définir l'attention visuelle, et enfin décrire les processus attentionnels à travers leurs différentes taxonomies et certains modèles de ces processus. Finalement, nous décrirons comment l'attention visuelle est mesurée.

3.1 Charge cognitive

3.1.1 Définitions et mesures

La charge cognitive fait référence à la quantité de ressources de la mémoire de travail utilisée pour la réalisation d'une action ou d'une tâche. Elle dépend d'une part de l'exigence de la tâche par ses caractéristiques et d'autre part des capacités de l'individu (Audley et al., 1979).

Une tâche est caractérisée par son but et par les difficultés de traitement qu'elle peut imposer à un individu. Celui-ci possède une capacité cognitive définie comme « une aptitude globale à la prise de décision qui se rapporte à la fonction de connaissance et met en jeu la mémoire, le langage, le raisonnement, l'apprentissage, l'intelligence, la résolution de problèmes, la perception ou l'attention » (Kapitaniak, 2021, p. 143). Les fonctions cognitives sont composées entre autres de l'attention, de la mémoire, de la mémoire de travail, des fonctions exécutives et des fonctions visuo-spatiales. Performer dans sa tâche nécessite un « coût cognitif », il est donc nécessaire d'utiliser des ressources cognitives pour la réalisation de celle-ci. Cependant, cette quantité semble limitée et son utilisation est dépendant de facteurs comme la fatigue, la motivation ou l'apprentissage. L'évaluation de la charge cognitive a beaucoup évolué à la fin

du XXème siècle avec des mesures objectives ou subjectives de cette charge. Les différentes méthodes d'évaluation seront expliquées par la suite dans ce travail de thèse.

Comme dit précédemment, la charge cognitive varie selon la tâche, mais aussi de manière intra individuelle. Lorsque le niveau de difficulté de la tâche, ou des tâches, augmente, la charge cognitive augmente en conséquence. Les mesures de la charge cognitives peuvent être subjectives, à l'aide d'un questionnaire, ou objectives, par des mesures physiologiques ou l'ajout d'une seconde tâche.

3.1.1.1 Les mesures subjectives

Paas (1992) est considéré comme ayant enclenché un virage dans l'aspect subjectif des mesures (Sweller et al., 2011). Il a mesuré l'intensité de l'effort mental perçu avec une échelle de Likert en neuf points, puis a observé un lien avec les performances à un test objectif. Ainsi, la mesure de l'intensité de l'effort est considérée comme un index de la charge cognitive (Paas, 1992). Il a ensuite été montré que cette mesure était très fiable (Paas et al., 1994) mais aussi plus sensible et moins intrusive que les mesures objectives (Paas & van Merriënboer, 1994). Par la suite, d'autres auteurs ont repris cette échelle de Likert en modifiant les items, ne parlant plus d'effort mental mais de difficulté ou de facilité pour réaliser la tâche (Marcus et al., 1996). Quelle que soit la formulation utilisée, cette mesure est considérée comme sensible pour évaluer la charge cognitive imposée par les différentes procédures d'apprentissage (Sweller et al., 2011).

La charge de travail est une mesure qui a été étudiée en amont de la charge cognitive. En effet, Hart et Staveland, dès 1988, ont créé un outil de mesure de la charge de travail à partir de six dimensions, le NASA-TLX : les exigences mentale, physique et temporelle, l'effort, la performance et la frustration. Pour chacune de ces dimensions, suite à la réalisation d'une tâche, le participant doit répondre à une question en évaluant la charge à cette dimension entre 0 et 100 (Hart, 2006 ; Hart & Staveland, 1988). Ensuite, une comparaison par paire est effectuée pour évaluer les dimensions entre elles, en indiquant quelle dimension était la plus importante dans la réalisation de la tâche. A partir de toutes ces mesures, un score compris entre 0 et 100 est obtenu et permet d'évaluer subjectivement la charge de travail perçue pour la réalisation de la tâche. Plus ce score est élevé, plus la charge de travail l'est.

3.1.1.2 Les mesures objectives

Les mesures physiologiques peuvent se décomposer en trois parties : les mesures cérébrales, les mesures oculaires et les mesures cardiaques.

Pour les mesures cérébrales, il existe trois outils différents : tout d'abord l'IRMf (Imagerie à Résonance Magnétique fonctionnelle) ; ensuite l'EEG (électroencéphalogramme) ; enfin l'ERP (Event-Related Potential en anglais, soit potentiel évoqué en français). Parmi ces trois outils, l'EEG est celui qui s'utilise le plus souvent et le plus facilement car l'évaluation peut se faire en mouvement ou en extérieur, tandis que pour les deux autres outils ce n'est pas possible. La variable mesurée par l'EEG est la suppression du rythme alpha. La charge mentale est corrélée avec cette mesure de l'EEG. La suppression du rythme alpha peut détecter l'épuisement des ressources en processus de mémoire, par une augmentation de sa puissance (Ryu & Myung, 2005).

Pour les mesures oculaires, la variable la plus utilisée pour évaluer la charge mentale est le clignement des yeux. Soit par un oculomètre, soit par l'activité électromyographique au niveau des yeux, la fréquence de clignement ainsi que le temps de clignement peuvent être enregistrés. La charge mentale et les clignements des yeux ont une relation inverse. Lorsque l'attention visuelle, nécessaire à la réalisation de la ou des tâche(s), augmente alors la fréquence de clignement diminue, tout comme la durée de ces clignements (Ryu & Myung, 2005). Lorsque les yeux se ferment, les informations visuelles ne sont plus disponibles, ce qui explique cette diminution du nombre et du temps des clignements. Avec un oculomètre, il est également possible de mesurer le diamètre pupillaire. Ce diamètre est également une variable influencée par la charge cognitive (Ahern & Beatty, 1979 ; Hess & Polt, 1964 ; van der Wel & van Steenbergen, 2018). En effet, plus les pupilles sont dilatées (i.e., avec un plus grand diamètre pupillaire), plus la charge cognitive est importante. Cependant le diamètre pupillaire est contesté pour évaluer la charge cognitive dans la littérature, car celui-ci est également influencé par d'autres facteurs comme la luminosité ou la fatigue (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 ; Duchowski et al., 2018) mais aussi car la mesure peut être faussée par la distorsion hors axe de l'œil (Duchowski et al., 2018 ; Mathur et al., 2013).

Pour les mesures cardiaques, c'est la variabilité de la fréquence cardiaque (HRV ou *Heart Rate Variability*) qui est généralement évaluée, notamment par l'analyse spectrale. La fréquence peut être décomposée en trois catégories : les basses fréquences de 0,02Hz à 0,06Hz ; les moyennes

fréquences de 0,07Hz à 0,14Hz ; les hautes fréquences de 0,15Hz à 0,50Hz (Mulder, 1979). Alors que les basses fréquences permettent la régulation de la température corporelle, les hautes fréquences modulent la respiration, et les moyennes fréquences régulent la pression artérielle (Mulder, 1979).

Pour réaliser des mesures optimales, il est conseillé d'utiliser plusieurs outils de mesure, et/ou de faire des régressions multiples entre ces outils et les mesures subjectives. Certains outils, ou plus précisément certaines réactions physiologiques, sont plus sensibles aux changements de la charge cognitive que d'autres selon la nature des tâches, mais aussi selon les modalités et les ressources nécessaires (Isreal et al., 1980 ; Ryu & Myung, 2005). Ainsi, combiner plusieurs mesures avec des coefficients, lors d'une double tâche, permet une évaluation plus précise de la charge mentale.

3.1.2 Double tâche

3.1.2.1 Paradigme de la double tâche

L'humain est constamment en train d'effectuer plusieurs tâches simultanément dans sa vie quotidienne. Ceci est également le cas dans le domaine industriel. Le travailleur, doit en général effectuer une tâche principale nécessaire à la production, mais en parallèle il effectue différentes tâches telles que parler, compter ou d'autres tâches aussi bien motrices que cognitives.

En laboratoire, pour étudier l'effet d'une tâche sur l'autre, notamment concernant les ressources disponibles, un protocole classiquement utilisé est la double tâche. Une personne est placée dans une situation de double tâche lorsque celle-ci doit réaliser, simultanément, deux tâches distinctes. Ces deux tâches utilisent souvent des modalités distinctes : motrice, auditive, visuelle, mémorielle. Dans ce travail de thèse, nous utiliserons une situation de double tâche avec une tâche principale motrice et une tâche secondaire auditive.

Dans le paradigme de la double tâche, l'influence d'une des tâches sur l'autre est évaluée à partir du coût de double tâche. Sur la base des performances à la tâche dans les deux conditions (simple et double tâche), ce coût est mesuré à l'aide de la formule suivante (Bishnoi & Hernandez, 2021 ; Kelly et al., 2010 ; Patel et al., 2014 ; Yang et al., 2020) : $[(Simple\ tâche - Double\ tâche) / Simple\ tâche * 100]$. Un coût calculé important représente une forte dégradation

de la performance en double tâche par rapport à cette même performance en simple tâche. Plus les performances en double tâche se dégradent, plus cette tâche mesurée nécessitait de ressources pour la réaliser.

En double tâche, une des deux peut être inconsciemment priorisée selon les capacités et les réserves cognitives et/ou motrices disponibles (Yogev-Seligmann et al., 2012). Dans l'étude de Yogev-Seligmann et ses collaborateurs (2012) traitant de la marche comme tâche motrice, cette réserve est appelée « réserve posturale ». Celle-ci est plus importante chez de jeunes adultes en bonne santé que chez des adultes plus âgés (Alexander, 1994). La conscience de soi (i.e., la connaissance de soi-même et de son environnement) a un impact sur l'estimation du danger, qui permet à la personne d'évaluer le danger potentiel de la tâche et ses propres limites (Yogev-Seligmann et al., 2012). Ainsi, l'âge, le statut cognitif de l'individu, son expertise, sa personnalité, la nature et la complexité de la tâche sont des facteurs pouvant influencer la priorisation et l'allocation des ressources entre les deux tâches (Alexander, 1994 ; Bherer et al., 2005 ; Gage et al., 2003 ; Lundin-Olsson et al., 1997 ; Schmidt & Wrisberg, 2008 ; Serrien, 2009 ; Yogev-Seligmann et al., 2012). Cependant, il est également possible de réguler volontairement l'allocation des ressources attentionnelles dans le but de prioriser une des deux tâches (McLeod, 1977). Une consigne peut être donnée à l'individu de prioriser une tâche par rapport à l'autre (Bardy, 1991).

3.1.2.2 Les tâches motrices lors d'une situation de double tâche

Dans la situation de double tâche avec comme tâche principale une tâche motrice et pour tâche secondaire une tâche cognitive, une grande majorité des études utilise la marche comme tâche motrice (Al-Yahya et al., 2011 ; Beauchet et al., 2005 ; Dubost et al., 2008 ; Patel et al., 2014 ; Yogev-Seligmann et al., 2010, 2012) ou bien une tâche posturale (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Richer et al., 2017 ; Richer & Lajoie, 2019).

Lors de l'utilisation de la marche comme tâche motrice, l'étude de Dubost et ses collaborateurs (2008) a comparé les paramètres spatio-temporels de la marche (i.e., longueur, durée et vitesse des foulées) à allure préférentielle en simple tâche d'une part et dans une situation de double tâche par l'ajout d'une tâche n'énumération de noms d'animaux d'autre part. Il a été observé une augmentation du temps de foulée sans modification de leur longueur en double tâche, donc

une diminution de la vitesse de marche. En fait, la locomotion partage des ressources centrales similaires à celles nécessaires à la réalisation d'une tâche cognitive (Kahneman, 1973), dans l'aire motrice supplémentaire et le cervelet (la Fougère et al., 2010). C'est le partage des ressources qui dégrade la ou les performances aux tâches. Lorsqu'aucune tâche n'est priorisée, Norman et Bobrow en 1975, ont représenté cette dégradation à travers le « Performance Operating Characteristic » (P.O.C.). La courbe présente les performances d'une tâche en fonction des performances de l'autre tâche. L'écart de cette courbe avec le point d'indépendance (i.e., réussite complète aux deux tâches lorsqu'elles sont réalisées seules) permet de rendre compte des ressources communes aux deux tâches.

Pour les études évaluant le contrôle postural, prenons pour exemple celle de Polskaia et Lajoie en 2016. Les participants devaient rester debout sur une plateforme de force où les déplacements du centre de pression étaient enregistrés. Ils ont réalisé cette activité soit en simple tâche soit en double tâche avec l'ajout d'une tâche cognitive. Les résultats de cette étude ont montré que la surface de déplacement du centre de pression ainsi que les déplacements antéro-postérieurs et médio-latéraux étaient réduits dans la situation de double tâche, améliorant donc le contrôle postural.

Cependant, ces tâches motrices sont pleinement automatisées, ne demandant que très peu de ressources cognitives aux participants. Les études qui s'intéressent à des tâches motrices non automatisées sont généralement simples, monoarticulaires, de faibles amplitudes et restent très répétitives (Bardy, 1991). La tâche de tapping en est un exemple (Serrien, 2009 ; Wu et al., 2013). Dans l'étude de Serrien (2009), les participants ont effectué une tâche de tapping sur un clavier avec une main ou avec les deux mains simultanément, en simple tâche et en double tâche avec une tâche cognitive de suivi mental. Les résultats ont indiqué une augmentation du temps de cycle à la tâche motrice en double tâche par rapport à la simple tâche, lorsque la tâche de tapping devait être réalisée avec les deux mains. Ce résultat a donc montré, par la dégradation de ces performances en double tâche, que la demande en ressources cognitives était plus importante lorsque les deux mains étaient nécessaires. Ces interférences s'expliquent à partir des théories impliquant des limitations structurelles, de capacité ou stratégiques (Kahneman, 1973 ; Navon & Miller, 1987 ; Pashler, 1994). L'augmentation de la difficulté de la tâche engendre un plus grand flux d'informations à traiter, impliquant ainsi les fonctions exécutives pour affecter les ressources disponibles et planifier les priorités de traitement (Baddeley et al., 1997). Ces fonctions se situent au niveau du cortex préfrontal (Dreher & Grafman, 2003). Le

cortex prémoteur ayant un rôle dans la restriction de la sélection des réponses (Marois et al., 2006), la double tâche complexe impose des limites à la planification des réponses. Ce sont les contraintes neuronales, lorsque la demande devient trop forte, qui semblent imposer des limitations à la réalisation des deux tâches.

Contrairement aux études précédentes, certains auteurs se sont intéressés à l'influence d'une tâche motrice sur une tâche cognitive. Ils ont observé une réduction des performances cognitives lorsque les participants effectuaient la tâche cognitive en marchant par rapport à sa réalisation en une position fixe (Beauchet et al., 2005). Lorsque la marche était plus rapide (i.e., la tâche devenait plus difficile), le coût cognitif augmentait, donc les performances à la tâche cognitive diminuaient (Beauchet et al., 2005 ; Dennis et al., 2009 ; England & Granata, 2007 ; Patel et al., 2014).

Ainsi, lors d'une tâche motrice non automatisée, l'ajout d'une seconde tâche cognitive dégrade les performances à la tâche motrice. Cette baisse de performance s'explique par la nécessité de partager les ressources cognitives ainsi que certaines structures neurologiques entre les deux tâches. De plus, augmenter le niveau de difficulté d'une des deux tâches accroît la demande de ressources, ce qui dégrade nécessairement les performances à l'autre tâche.

3.1.2.3 Les différents types de tâche cognitive

Il existe plusieurs types de tâches cognitives. Al-Yahya et ses collaborateurs (2011) en distinguent cinq en fonction des exigences de la tâche et des processus mentaux nécessaires à leur exécution :

- Tâches de temps de réaction : le temps entre la présentation d'un stimulus sensoriel et la réponse motrice est mesuré dans ces tâches. Elles évaluent la vitesse de traitement ainsi que l'attention soutenue. Un temps de réaction long signe un déficit attentionnel à la tâche (Lezak et al., 2004). Cette tâche correspond généralement à un temps de réaction simple sur un bouton-poussoir (Bayot et al., 2018) ;
- Tâches de discrimination et de prise de décision : ces tâches nécessitent une attention sélective sur une caractéristique spécifique d'un stimulus et à laquelle répondre en conséquence. Elles mesurent l'attention sélective et l'inhibition. La tâche de Stroop en est un exemple connu (Bayot et al., 2018 ; MacLeod, 1991). Il est aussi possible

d'effectuer une tâche de temps de réaction au choix auditif (e.g., répondre le plus rapidement possible en indiquant si la tonalité auditive est forte ou faible) ou une tâche de classification de nombres (e.g., indiquer si le stimulus auditif correspond à la consigne en répondant par oui ou non) ;

- Tâches de suivi mental : des informations doivent être gardées en mémoire tout en effectuant un processus mental (Lezak et al., 2004). Elles examinent l'attention soutenue ainsi que la vitesse de traitement de l'information (Lezak et al., 2004). Ces tâches peuvent être par exemple des tâches arithmétiques (Mori et al., 2018 ; Patel & Bhatt, 2014 ; Tisserand et al., 2018) ;
- Tâches de mémoire de travail : des informations doivent être gardées en mémoire pour être traitées (Baddeley, 1986), sans effectuer de processus mental contrairement aux tâches de suivi mental (D'Esposito et al., 1999). Ces tâches mesurent également l'attention soutenue, la vitesse de traitement de l'information et la mémoire de travail dans ses quatre composantes selon le modèle de Baddeley (1986). Ces tâches peuvent être de retenir un nombre d'items dans une liste (Wang & Gathercole, 2013), mais aussi de compter le nombre d'apparitions d'un mot ou d'une lettre dans un enregistrement audio (Richer et al., 2017 ; Richer & Lajoie, 2019) ;
- Tâches de fluence verbale : il faut produire des mots de manière spontanée selon une consigne spécifique comme de donner des noms d'animaux, de villes ou de fruits (Pang et al., 2018 ; Yang et al., 2016). Elles examinent les fonctions exécutives ainsi que la mémoire sémantique (Lezak et al., 2004).

En situation de double tâche, des interférences entre les deux tâches sont observables. En fait, effectuer une seconde tâche en parallèle de la tâche principale peut influencer les performances à cette dernière, généralement dans le sens d'une dégradation de celles-ci. Quelques études se sont intéressées à l'influence de plusieurs tâches cognitives sur une même tâche motrice, dans le but de comparer les différents types de tâche cognitive comme décrits par Al-Yahya et ses collaborateurs (Patel et al., 2014). Dans l'expérience de Patel et ses collaborateurs (2014), les auteurs ont comparé une marche à allure préférentielle en simple tâche et une marche similaire en double tâche avec l'ajout d'une tâche cognitive. Quatre types de tâche cognitive y étaient comparés : temps de réaction ; fluence verbale ; mémoire de travail ; discrimination et prise de décision. Les quatre tâches cognitives ont dégradé la vitesse de marche, mais certaines plus que d'autres. En fait, la priorisation inconsciente d'une tâche par rapport à une autre dans une

situation de double tâche peut être influencée par la nouveauté de celle-ci, mais aussi et surtout par le niveau de complexité de cette seconde tâche (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Schmidt & Wrisberg, 2008 ; Yogev-Seligmann et al., 2012). En effet, une tâche plus difficile requiert plus de ressources attentionnelles et cognitives qu'une tâche plus facile.

Dans ce présent travail de thèse, nous plaçons les participants dans une situation de double tâche où ils doivent simultanément performer dans une tâche principale motrice et dans une tâche secondaire cognitive, plus exactement une tâche auditive de mémoire de travail. Le choix d'ajouter une tâche auditive s'est fait pour éviter des interférences avec la tâche motrice utilisant également la vision dans sa réalisation.

3.1.3 Stress

Face à une situation, la réponse psycho-physiologique d'une personne diffère d'un individu à l'autre, notamment en raison de l'expérience et des situations passées vécues (Szalma, 2008). En fait, une même situation n'est pas ressentie de la même façon par différents individus, et leurs réactions vont varier. Il existe deux types de mesures de ces réponses psycho-physiologiques : les mesures subjectives par auto-évaluations de leurs ressentis et les mesures objectives des modifications physiologiques observables par l'activité électrodermale, l'activité électromyographique faciale et l'activité cardiovasculaire. Dans ce présent travail de thèse, seule l'activité cardiovasculaire sera étudiée, c'est pourquoi seules ces mesures sont développées dans cette partie.

L'activité cardiovasculaire est régulée par le système nerveux autonome. Ainsi, sa régulation ne peut pas être contrôlée volontairement. Les modifications de cette activité cardiovasculaire sont donc des témoins forts d'un changement de comportement émotionnel.

Les mesures physiologiques de l'activité cardiovasculaire s'effectuent au niveau du cœur. Cet organe est un muscle qui se contracte, de manière involontaire, en suivant un certain rythme, et qui bénéficie d'une régulation des systèmes nerveux sympathique et parasympathique. Le système nerveux sympathique accélère le rythme cardiaque face à des situations de stress tandis que le système nerveux parasympathique réduit ce rythme cardiaque. Un tracé typique se compose de cinq ondes correspondant aux différentes diastoles et systoles du cœur : l'onde P ; l'intervalle PR ; le complexe QRS avec la vague R ; l'intervalle QT et l'onde T.

Pour mesurer l'activité électrique du muscle, un électrocardiogramme (ECG) peut être utilisé, tandis que la fréquence cardiaque (FC ou *HR* en anglais pour *Heart Rate*) peut se mesurer avec des bandeaux thoraciques ou des montres connectées, moins invasifs que l'ECG. Cependant, l'ECG reste l'outil le plus fiable car il permet de calculer la FC mais aussi la variabilité de la fréquence cardiaque (*HRV* pour *Heart Rate Variability*).

La FC se mesure en battements par minutes (ou bpm). La HRV utilise l'intervalle inter battement entre deux vagues R consécutives. La HRV est la mesure la plus utilisée et la plus fiable pour mesurer les réactions physiologiques face au stress.

Une faible HRV signifie que la régulation de la fréquence cardiaque est monotone (H.-G. Kim et al., 2018). Ainsi, plus la HRV est élevée, plus la personne réagit face à la situation de stress. L'intervalle inter-battement peut aussi s'évaluer par une analyse spectrale, avec le ratio entre les basses fréquences (inférieures à 0,15Hz) et les hautes fréquences (entre 0,15Hz et 0,4Hz). Lorsque ce ratio est faible, l'activité du système nerveux parasympathique augmente, signifiant une augmentation de la fréquence cardiaque et une augmentation du stress. Au contraire, l'augmentation de l'activité du système nerveux sympathique, visible par un ratio élevé, signifie une baisse de la fréquence cardiaque et une diminution du stress (Kim et al., 2018 ; Sloan et al., 1994).

3.2 L'attention visuelle

3.2.1 Définition de l'attention visuelle

« Tout le monde sait ce qu'est l'attention. C'est la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vive, d'un objet ou d'une suite de pensées parmi plusieurs qui semblent possibles »¹⁰ (James, 1890). Dans la littérature, il existe plusieurs définitions de l'attention, que ce soit concernant la totalité des modalités sensorielles ou uniquement pour l'attention visuelle. En effet, l'attention n'est pas un terme qui peut facilement être défini. « Même si William James

¹⁰ “everyone knows what attention is. It is the taking possession by the mind, in clear and vivid form, of one out of what seem several simultaneously possible objects or trains of thought.”

a déclaré que tout le monde sait ce qu'est l'attention, il n'y a pas de définition unique, satisfaisante de l'attention »¹¹ (Wolfe & Horowitz, 2004).

Dans son environnement, l'humain peut capter une multitude d'informations, externes et internes, par ses différentes modalités sensorielles. Toutefois, la quantité d'informations est beaucoup trop importante pour toutes les traiter, les ressources attentionnelles étant limitées par les capacités du système cognitif. Il est donc nécessaire de sélectionner certaines informations : celles qui seront traitées. Il existe plusieurs théories de filtrage qui expliquent à quel moment du traitement une information va être sélectionnée ou délaissée (Broadbent, 1958 ; Deutsch & Deutsch, 1963 ; Norman, 1968 ; Sperling, 1960 ; Treisman, 1960, 1964, 1969). Ces théories diffèrent notamment au niveau de l'étape de traitement au cours de laquelle ce filtre opère, pouvant être positionné de manière précoce, tardive ou mouvante. Le degré d'analyse des informations diffère également entre les théories. Il existe différents modèles pour décrire ce qu'est l'attention. Dans la littérature, la majorité des modèles théoriques de l'attention s'appuient sur les processus ascendants, bottom-up, et descendants, top-down.

3.2.2 Les processus attentionnels : la sélection visuelle par les processus bottom-up et top-down

En 1980, Posner distingue deux types d'orientation de l'attention. D'une part, celle-ci peut être cachée (covert), correspondant à un déplacement mental de l'attention sans comportement moteur associé, donc sans mouvement oculaire. D'autre part, l'orientation de l'attention peut être explicite (overt) où les déplacements de l'attention impliquent des mouvements oculaires, parfois associés à des mouvements de la tête. Les descriptions des deux types d'orientation de l'attention sont tirées de l'article d'Itti et Koch (2001).

Dans la littérature, la prise d'informations visuelles dépend de deux processus attentionnels : bottom-up et top-down (Theeuwes, 2010). Les processus bottom-up (ascendants) dépendent directement des entrées sensorielles. En effet, ces processus renvoient à la saillance physique d'un objet dans l'environnement, celle-ci pouvant se définir comme ayant une caractéristique

¹¹ "even though William James famously declared that *Everyone knows what attention is*, there is no single, satisfying definition of attention"

« qui saute aux yeux » de l'individu. Cette saillance dépend donc de sa couleur, de son orientation, de son intensité et de son mouvement selon les caractéristiques de l'environnement. Dans le cadre gauche de la Figure 20, le symbole « \ » est facilement trouvé car il se distingue par sa caractéristique physique, ici son orientation, par rapport aux autres de l'environnement. Ainsi, lorsqu'une personne regarde une scène visuelle, le processus bottom-up guide l'exploration visuelle en dirigeant le regard vers la zone la plus saillante. La sélection est un processus passif et automatique (Olivers & Hickey, 2010 ; Theeuwes, 2010). Les processus débutent au niveau des aires cérébrales de bas niveau puis les informations captées sont transmises aux aires cérébrales supérieures.

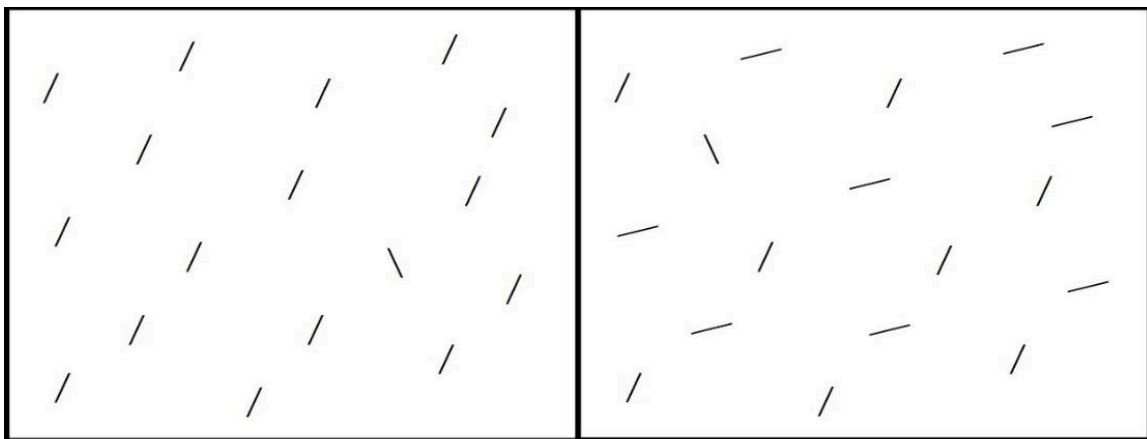


Figure 20 : Pour chaque cadre, il faut trouver le symbole "\". Dans le cadre de gauche il "saute aux yeux" tandis que dans le cadre de droite il nécessite plus de recherche (Lemonnier et al., 2021a).

Les processus top-down (descendants) dépendent de la tâche à réaliser, de l'objectif de l'individu, mais aussi de ses connaissances. Dans le cadre droit de la Figure 20, le symbole « \ » ne saute plus aux yeux, cela nécessite davantage de recherche guidée par l'objectif « trouver le symbole \ » pour le repérer. À l'inverse des processus bottom-up, les processus top-down sont initiés dans les aires cérébrales supérieures puis les informations sont envoyées aux aires de bas niveau qui modulent le traitement des entrées sensorielles. La sélection top-down est un mécanisme pouvant se définir comme étant un processus actif et volontaire (Theeuwes, 2010). Pourtant, il existerait deux types de processus top-down : les volontaires et les involontaires (Gaspelin & Luck, 2018 ; Hopfinger et al., 2000).

Malgré la distinction et l'opposition entre les processus ascendants et descendants, les deux sont complémentaires et travaillent en alternance pour diriger la prise d'informations visuelles. Lorsque le regard est dirigé vers un objet saillant, c'est le processus bottom-up qui est mis en jeu. La décision de désengager son attention du stimulus saillant nécessite un contrôle

descendant pour déclencher un mouvement oculaire (Theeuwes, 2010). De plus, un stimulus saillant non-pertinent peut ne pas être traité lorsque la charge perceptuelle est trop importante ou par un contrôle exécutif volontaire des processus top-down qui inhibent ce stimulus (Brand-D'Abrescia & Lavie, 2008). Ainsi, les objectifs de l'individu pour réaliser sa tâche et la saillance de l'environnement permettent de diriger le regard de l'individu vers l'information qu'il souhaite.

Il existe d'autres taxonomies pour décrire les différents processus attentionnels, notamment la distinction entre les processus endogène et exogène (Chica et al., 2013). Le terme endogène faisant référence à « dedans », c'est-à-dire aux processus endogènes qui font appel aux connaissances de l'individu au sujet de l'environnement et de l'objectif de la tâche. L'attribution de l'attention est intentionnelle dans ce cas et dépend des attentes de l'individu. Les processus exogènes, faisant référence à « dehors », sont généralement présents lorsque l'individu semble avoir peu de connaissances de l'environnement ou de l'objectif. Ces processus correspondent plutôt à des réflexes, réactionnels aux stimuli de l'environnement, et notamment à la saillance de celui-ci. Ces deux processus fonctionneraient en fait de manière combinée, avec des alternances entre les deux dans le temps (Chica et al., 2013 ; Godijn & Theeuwes, 2002 ; Yantis, 2000).

Les nomenclatures présentées ci-dessus semblent présenter certaines similarités : entre les processus bottom-up et exogène et entre les processus top-down et endogène. Ils sont même cités par certains auteurs comme étant les mêmes (Cohen et al., 2012 ; Peelen et al., 2004). Toutefois, des différences et désaccords semblent s'observer dans la littérature et le lien entre ces deux taxonomies n'est plus complet (Dugué et al., 2018). Ces différences s'observent notamment avec l'apprentissage et le recours aux connaissances qui rendent la réponse à un stimulus automatique (Awh et al., 2012). En effet, dans ce cas, la réponse correspond à un processus endogène d'après la seconde nomenclature ; c'est l'apprentissage qui a déclenché la réponse sans même que l'individu en ait eu conscience. Au contraire, d'après la première nomenclature, le processus semble être bottom-up car la réponse se fait à la suite du stimulus sans conscience de celle-ci. En raison de ces désaccords, dans ce travail de thèse nous conservons la distinction bottom-up et top-down pour décrire les processus de sélection visuelle.

3.2.3 Les différents processus décrits par différents modèles

Deux types de modèles se distinguent dans la littérature : d'une part les modèles basés sur les processus bottom-up qui ont par la suite donné des modèles computationnels ; d'autre part les modèles basés sur les processus top-down qui ont par la suite donné des modèles théoriques. Cependant la plupart des modèles présentent les deux types de processus, bien que l'un des deux reste prédominant. Nous allons voir certains de ces modèles.

Concernant les modèles théoriques, nous pouvons citer le modèle basé sur les attentes de Summerfield et Egner (2009). Ce modèle crée des prédictions qui sont comparées avec les informations issues des entrées sensorielles. Cependant, les modèles théoriques ne sont pas facilement implémentables. En effet, il n'est pas possible de prendre en compte l'ensemble des éléments des processus top-down comme les objectifs ou l'expérience.

Parmi les modèles computationnels, nous pouvons citer ceux de Koch & Ullman (1985) et d'Itti et ses collaborateurs (1998). Pour résumer, les modèles computationnels prédisent l'allocation de l'attention à partir des processus bottom-up selon cinq points : la saillance perceptive du stimulus selon l'environnement et le contexte ; une carte de saillance ; l'inhibition du retour ; l'interaction entre les mouvements des yeux et l'allocation de l'attention ; une composante top-down qui peut modifier le choix des zones fixées (Itti & Koch, 2001). Les modèles strictement bottom-up ne sont cependant pas adaptés aux tâches naturelles, d'où l'introduction de composante top-down (Jovancevic-Misic & Hayhoe, 2009).

Ainsi, les modèles strictement bottom-up et strictement top-down présentent des limites pour les situations naturelles et pour l'implémentation. C'est pourquoi de nombreux modèles partent de modèles bottom-up et y ajoutent des composantes top-down. Le modèle de Sprague et ses collaborateurs (2007) s'appuie sur l'incertitude et la récompense. Les micro-comportements (i.e., les déplacements des yeux) dépendent de l'environnement et de la tâche, ainsi des composantes bottom-up et top-down.

Un autre modèle, celui de Knudsen (2007), inspiré des modèles de Desimone et Duncan (1995) et de Miller et Cohen (2001), décrit l'attention comme un processus ayant pour but l'accès à la mémoire de travail. Il s'appuie sur le fait que l'attention repose sur quatre composantes fondamentales : un filtre de saillance, un contrôle sensitif, une sélection compétitive et la mémoire de travail. Les informations les plus pertinentes, à un moment donné, doivent être

sélectionnées pour être évaluées en mémoire de travail. Ces informations y sont analysées, puis des décisions sont prises pour élaborer un plan d'actions. Dans ce modèle, les deux types de processus se retrouvent à travers le filtre de saillance et le contrôle sensitif. D'une part, le filtre de saillance, correspondant aux influences bottom-up, renforce automatiquement les réponses aux stimuli peu fréquents dans le temps, dans l'espace ou avec une forte saillance (Koch & Ullman, 1985). D'autre part, le contrôle sensitif, correspondant aux influences top-down, est un processus qui régule la force relative des signaux des différents canaux d'informations se disputant l'accès en mémoire de travail.

3.2.4 Les mesures de l'attention visuelle : l'oculométrie

Dans ce présent travail de thèse, la question de l'attention visuelle est importante. Ainsi, malgré la présence d'une tâche cognitive n'impliquant que des processus mentaux, soit une orientation cachée de l'attention, nous allons majoritairement nous intéresser à l'attention visuelle explicite avec l'étude de cette attention à travers les mouvements des yeux.

En fait, l'attention visuelle est étroitement liée aux mouvements des yeux (Rayner, 1998), la recherche active d'informations se fait par le regard (Henderson, 2003). L'information visuelle doit être captée par l'œil. Cependant en raison de l'anatomie de l'œil, pour que cette information soit précise, détaillée et en couleurs, celle-ci doit se situer à un endroit précis de l'œil : la fovéa (Frénette, 2013). Puisque la fovéa possède un champ visuel relativement faible, de quelques degrés, il est donc nécessaire d'avoir un déplacement de l'œil pour capter une information qui est initialement en dehors du champ visuel et de la fixer. Les mouvements oculaires traduisent donc des processus cognitifs (Yarbus, 1967). Ainsi, un déplacement attentionnel déclenche un mouvement des yeux (Posner & Cohen, 1984), et inversement un mouvement volontaire implique un déplacement de l'attention (Kowler et al., 1995). Ainsi, l'attention visuelle peut se mesurer indirectement à l'aide d'un oculomètre. Comme son nom l'indique, cet outil permet d'enregistrer les déplacements oculaires.

Les premières études sur le comportement oculomoteur s'y intéressaient à partir d'une tête maintenue stable. Cependant, en condition écologique, la tête n'est pas stable mais plutôt en mouvement. Le maintien de la tête ou non modifie le comportement oculomoteur. En effet, lorsque la tête est en mouvement, les systèmes oculomoteurs, notamment par le réflexe

vestibulo-oculaire, compensent ces mouvements pour stabiliser l'image rétinienne et garder la fixation (Ferman et al., 1987 ; Kowler, 2011).

Les mouvements des yeux sont très largement utilisés dans la littérature pour étudier de nombreuses tâches telles que la lecture (Godfroid et al., 2018 ; Rayner, 1998), la conduite automobile (Deng et al., 2020 ; Lemonnier et al., 2015), la réalité virtuelle (Luro & Sundstedt, 2019 ; Pfeiffer et al., 2020), le sport (Hüttermann et al., 2018 ; Marques et al., 2018) mais aussi pour les HRI (Barz et al., 2021 ; Palinko et al., 2016).

3.2.4.1 Fixations et saccades : définition de ces événements

Est appelé fixation le moment où l'œil ne bouge pas. Le mouvement d'un œil est appelé une saccade et se définit uniquement sur un critère temporel. Dans la zone de la fixation, de petits mouvements de l'œil sont observés, mais le regard reste dans cette zone. Ces petits mouvements sont appelés des microsaccades.

En effet, une fixation permet de conserver une position relativement stable, selon un certain seuil de dispersion pendant une certaine durée, avec une vitesse du mouvement de l'œil qui n'excède pas un certain seuil (Jacob & Karn, 2003). Parallèlement, une saccade permet de changer la fixation d'emplacement vers une nouvelle source d'information. Les fixations et saccades sont décrites dans un exemple de la Figure 21.

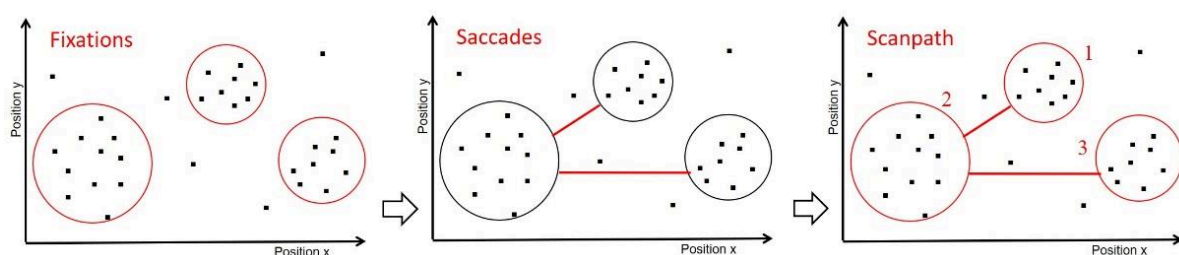


Figure 21 : Construction des fixations, des saccades et du scanpath à partir des coordonnées du regard (Lemonnier et al., 2021b)

Pour définir l'événement (fixation ou saccade), il est nécessaire de déterminer un seuil. Il existe différents algorithmes pour classer ces différents événements. Certains algorithmes se fondent sur l'analyse de la vitesse du mouvement oculaire (e.g., I-VT, I-HMM), tandis que d'autres s'intéressent à la dispersion spatiale (e.g., I-MST, I-DT). Nous allons nous intéresser à deux de

ces algorithmes : tout d'abord, le modèle I-VT (i.e., identification du seuil de vitesse), puis le modèle I-DT (i.e., identification du seuil de dispersion).

Le modèle I-VT fournit un résultat en degrés par seconde ($^{\circ}/\text{sec}$) et la comparaison se fait selon une valeur seuil qui diffère également dans la littérature allant de $5^{\circ}/\text{sec}$ (Leigh & Zee, 2015) à $300^{\circ}/\text{sec}$ (Salvucci & Goldberg, 2000). Le modèle I-DT donne un résultat en degrés ($^{\circ}$) des seuils de dispersion variant dans la littérature entre $0,033^{\circ}$ (Yarbus, 1967), soit 2 minutes d'arc, et 2° (Rayner, 1998). Pour ces deux algorithmes, lorsque la valeur est inférieure au seuil, l'événement est codé comme une fixation alors qu'une valeur supérieure au seuil indique que l'événement est une saccade.

Dans ce travail de thèse, nous nous appuyons sur un algorithme représentant la dispersion spatiale et nous définissons la fixation comme une stabilisation du regard pendant plus de 75ms dans un rayon inférieur à $0,5^{\circ}$ (Komogortsev et al., 2010), et la saccade comme un mouvement oculaire supérieur à 30ms (Dzeng et al., 2016 ; Sodhi et al., 2002).

L'enchaînement des fixations et des saccades permet d'obtenir un chemin de balayage (scanpath) permettant de décrire visuellement le chemin parcouru par le regard. La Figure 21, sur le schéma de droite, représente un scanpath selon les fixations et saccades.

3.2.4.2 Variables mesurées avec l'oculomètre

Lors d'un enregistrement avec un oculomètre, le nombre de fixations peut être mesuré pour toute la scène visuelle tout au long de l'enregistrement, ou pour un événement temporel précis lorsqu'une fenêtre temporelle est codée. Ce nombre peut également être calculé comme un taux. En effet, en divisant le nombre de fixations par le temps total de l'enregistrement ou par le temps d'un événement précis, le taux de fixation globale, en fixations par seconde (fix/s), est obtenu. D'un point de vue temporel, la durée de chacune des fixations est calculée par les différents algorithmes. Ainsi, il est possible de mesurer la durée moyenne d'une fixation. Cette dernière variable témoigne de la difficulté d'extraction des informations dans la scène visuelle (Jacob & Karn, 2003). En effet, plus une fixation est longue, plus l'information peut être difficile à extraire.

A l'inverse du paragraphe précédent, celui-ci va s'intéresser uniquement au plan spatial des fixations. En effet, dans la scène visuelle, des aires d'intérêt (AOI ou *area of interest* en anglais) peuvent être créées. Ces AOI correspondent à des parties de la scène visuelle (e.g., le gardien de but au moment de tirer un pénalty, un panneau de signalisation lors d'une conduite), mouvantes ou non, qui sont analysées plus précisément.

Ainsi, pour chaque AOI, le nombre de fixations dans celle-ci est calculé. Cette variable reflète l'importance d'une zone d'intérêt : plus ce nombre est grand, plus cette zone est importante dans la scène visuelle (Jacob & Karn, 2003). Cependant, la mesure du nombre de regards dans l'AOI est plus significative que le nombre de fixations. Cette variable correspond à une concaténation de plusieurs fixations consécutives dans la même zone d'intérêt. Pour une analyse plus précise dans les AOI, il faut se pencher sur les fixations dans ces zones d'intérêt sur les plans spatial et temporel. Ainsi, la durée du regard dans une AOI correspond aux durées cumulatives de plusieurs fixations consécutives dans une AOI. Le regard contient donc plusieurs fixations, incluant un temps très faible pour des saccades courtes entre ces fixations. La fin du regard dans l'AOI est marquée par une fixation en dehors de la zone d'intérêt (Jacob & Karn, 2003). Cette variable peut également être mesurée comme un taux, en calculant la proportion des durées de regards dans une AOI sur le temps total de la recherche visuelle. Ces deux variables témoignent plus précisément de l'importance de la zone visuelle dans la scène visuelle.

Dans la littérature, l'intérêt porté aux saccades est moindre que celui porté aux fixations. Les déplacements oculaires permettent de changer de cibles dans la scène visuelle. Pour explorer l'ensemble de la scène visuelle, les saccades sont nécessaires, permettant au regard de se déplacer dans cette scène. Les saccades sont souvent mesurées par leurs durées, mais aussi par leurs vitesses et leurs accélérations (Di Stasi et al., 2013). La vitesse des saccades peut être évaluée soit par la vitesse moyenne des saccades soit par le pic de vitesse des saccades. Elles sont analysées à partir des plans verticaux et horizontaux. Il est à noter que les saccades horizontales sont plus rapides que les verticales, et que les saccades vers le haut sont plus rapides que celles vers le bas (Galley, 1989). La vitesse des saccades peut être influencée par des facteurs extérieurs (e.g., fatigue, alcool et drogues) mais aussi par des facteurs internes comme l'apprentissage ou les antisaccades (Di Stasi et al., 2012 ; Edelman et al., 2006 ; Grace et al., 2010). L'augmentation de la difficulté d'une tâche augmente la vitesse des saccades (Di Stasi et al., 2011 ; Galley, 1993).

3.2.4.3 Mode ambient ou mode local

Le comportement oculomoteur est déterminé par la prise d'informations visuelles. Ce comportement est catégorisé soit en mode ambient soit en mode local (Unema et al., 2005). Le mode ambient, également appelé scanning, permet une exploration plus intense de la scène visuelle. Il se caractérise par de courtes fixations et de grandes saccades. Au contraire, le mode local correspond à une exploration d'une zone spécifique. Celui-ci se caractérise par des fixations de longues durées et de petites saccades.

Une mesure récente permet de distinguer l'attention ambiante de l'attention focale. Il s'agit du coefficient K qui est déterminé à partir des durées des fixations et des amplitudes de saccades (Krejtz et al., 2016, 2017). Le coefficient K correspond à « la différence moyenne entre les valeurs standardisées de chaque amplitude de saccade (a_{i+1}) et la $i^{\text{ème}}$ durée de fixation qui la précède (d_i) »¹² (Krejtz et al., 2016, p. 4). Le coefficient K est égal à la moyenne de toutes les valeurs K, dont l'équation est la suivante avec μ_d et μ_a qui correspondent respectivement aux moyennes de durée des fixations et des amplitudes des saccades et σ_d et σ_a correspondent respectivement aux écart-types des durées des fixations et des amplitudes des saccades :

$$K_i = \frac{d_i - \mu_d}{\sigma_d} - \frac{a_{i+1} - \mu_a}{\sigma_a}, \text{ avec } K = \frac{1}{n} \sum_n K_i$$

Quand la valeur est positive cela signifie que l'attention est focale, tandis qu'une valeur négative indique une attention ambiante. Lorsque la valeur du coefficient K est égale à 0, ou compris entre -0,01 et 0,01, cela signifie que la longueur des fixations et l'amplitude des saccades qui les suivent sont équivalentes. Dans ce cas, l'attention n'est ni focale ni ambiante (Krejtz et al., 2016, 2017).

¹² the mean difference between standardized values of each saccade amplitude and its preceding i^{th} fixation duration

4 PROBLEMATIQUE

4.1 Un cobot dans une situation collaborative : quels impacts ?

4.1.1 Systèmes humain et hybride : deux environnements différents pour l'opérateur

Lorsqu'un opérateur travaille seul sur un poste de travail, il doit effectuer toutes les tâches nécessaires à ce poste. Avec l'introduction d'une autre personne, ou d'un cobot, cette tâche devient collaborative. Il faut donc une nouvelle répartition des tâches, ou sous-tâches, pour la réalisation commune de l'objectif de travail. Lorsqu'il s'agit d'un cobot pour la création de ce poste collaboratif, il est également nécessaire de prendre en compte les différentes limites du robot. En effet, celui-ci ne possède pas la même motricité fine que l'humain, et peut donc ne pas être capable de réaliser des tâches nécessitant cette motricité (Hentout et al., 2019). Il est également limité par ses différentes normes de sécurité qui permettent le travail de proximité avec l'humain (ISO 10218-1:2011). L'objectif de l'introduction d'un cobot est de maximiser la productivité tout en minimisant la charge de travail de l'humain (Pearce et al., 2018). L'aménagement du poste de travail, par une réflexion sur la disposition du plan de travail et du plan d'affectation des tâches, est donc nécessaire pour une introduction optimale du cobot (Michalos et al., 2018).

Dans la littérature, quelques articles se sont intéressés aux répercussions de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail. Avant d'allouer les différentes sous-tâches à chacun, les auteurs (Colim et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2020) évaluent la tâche lorsque l'opérateur la réalise seul. Sur le plan ergonomique, Gualtieri et ses collaborateurs (2020) évaluent la charge biomécanique à partir des différentes postures de travail lors de la réalisation de chacune des sous-tâches. Dans cette étude, la méthode RULA est utilisée pour évaluer les risques d'apparition de TMS à partir des positions articulaires des membres de l'opérateur, notamment sa nuque, son dos et ses membres supérieurs qui sont sollicités dans des postures difficiles. La méthode OCRA est également utilisée car la tâche évaluée est répétitive et se fait sur une longue durée. Pour l'étude de Colim et ses collaborateurs (2021), l'évaluation des risques musculosquelettiques des membres supérieurs s'effectuent objectivement avec un index de stress revisité (RSI) et subjectivement à l'aide d'une échelle « Category Ration-10 » (Borg, 1990).

Lorsque les sous-tâches à risques sont repérées, il existe deux possibilités pour redessiner le poste de travail en le rendant collaboratif : faire exécuter ces sous-tâches à risques par le cobot lorsque celui-ci peut les effectuer ou redessiner le poste de travail pour réduire les risques lors de la réalisation de ces sous-tâches.

Dans les deux études de Colim et ses collaborateurs (2021) et de Gualtieri et ses collaborateurs (2020), les auteurs ont observé une diminution du risque d'apparition de TMS lorsque la tâche est collaborative par rapport au travail seul. En effet, Gualtieri et ses collaborateurs observent une baisse de 12% et de 28% pour les côtés droit et gauche avec la méthode OCRA et constatent également une diminution encore plus importante avec l'évaluation RULA (diminution de 57% et de 50% pour les côtés droit et gauche sur le score RULA moyen ainsi qu'une réduction des valeurs maximales de 6 et 7 à 3 pour les deux côtés). Il est à noter que la réduction de ce risque est accompagnée d'une conservation de la performance. Ainsi, le bénéfice pour la santé de l'opérateur apparaît avec une performance de travail similaire, voire légèrement améliorée (Gualtieri, Palomba, et al., 2020). Cependant, dans ces deux études, la réorganisation du plan de travail (e.g., inclinaison du plan de travail de 30° avec l'axe horizontal pour minimiser la torsion du poignet) ainsi que la répartition des sous-tâches (avec une diminution du nombre de gestes à effectuer par l'opérateur) sont également des facteurs ergonomiques qui peuvent être à l'origine de ces diminutions.

Avant de changer physiquement le plan de travail et d'introduire le robot collaboratif dans la situation de travail, il est possible de tester numériquement les conséquences de l'introduction du cobot sur l'opérateur. Récemment, Ciccarelli et ses collaborateurs (2022) ont analysé la posture d'un opérateur numérique, avec une évaluation RULA, pour comparer la tâche à effectuer seul avec cette même tâche en collaboration avec un cobot. Lorsque les résultats sur le plan ergonomique sont positifs (baisse du score RULA dans cet exemple), la création du nouveau poste de travail avec le robot collaboratif peut être envisagée et réalisée.

Dans le cas d'une situation collaborative entre deux opérateurs humains, ou plus, les différentes tâches au niveau du poste de travail sont réparties aux différents travailleurs. Dans cette situation, un des travailleurs humains est remplacé par un robot collaboratif. La répartition des tâches peut rester similaire entre les systèmes humain et hybride ou être modifiée. La nouvelle répartition dépend d'une part des possibilités du robot collaboratif (e.g., insérer un écrou dans

une petite fente ne peut pas être réalisé par le robot en raison de ses limitations en motricité fine) et d'autre part de la fluidité des interactions entre l'humain et le cobot.

Pour introduire un cobot dans une situation déjà collaborative, donc remplacer une situation de collaboration humain-humain par un système de collaboration humain-cobot, il est nécessaire d'en analyser les conséquences sur le plan de la santé de l'opérateur. Cela passe notamment par une analyse du risque d'apparition des TMS comme énoncée précédemment, mais aussi par une analyse des interactions entre l'humain et le robot collaboratif : analyse de la fluidité des interactions, des performances du nouveau système, mais aussi de la charge mentale de l'opérateur dans sa nouvelle tâche.

En effet, l'introduction d'un cobot dans une situation collaborative peut d'une part engendrer une augmentation de la charge mentale de l'opérateur et d'autre part augmenter ses sources de distraction (Materna et al., 2018). Dans les études vues précédemment (Colim et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2020), une réduction des sollicitations biomécaniques a été observée. Cette diminution permettrait également de réduire le stress psychologique des opérateurs dans la réalisation de leur tâche de travail (Gualtieri, Monizza, et al., 2020).

Concernant l'acceptation du cobot par les opérateurs, il a été montré dans une étude récente que les cobots ne sont pas considérés comme des remplaçants d'opérateurs humains, mais comme des aides pour les opérateurs (Y. Cohen et al., 2019). D'ailleurs, une trajectoire plus fluide et plus humanoïde (i.e., en réduisant le jerk dans les mouvements du cobot) réduit le stress mental des opérateurs (Rojas et al., 2020) et augmente leur satisfaction et leur acceptation du cobot (Lasota & Shah, 2015). De plus, en améliorant l'acceptation du cobot et la confiance de l'opérateur en cette technologie, la productivité du nouveau système est meilleure du fait d'une réduction des temps d'attente de l'opérateur (Lasota & Shah, 2015).

Une étude récente s'est intéressée au comportement attentionnel de l'opérateur par son comportement oculomoteur (Mariscal et al., 2020). Des participants ont réalisé une tâche collaborative avec un autre humain et la même tâche avec un cobot, dans le but de comparer un système humain avec un système hybride. Cette étude n'a observé aucune différence significative dans le comportement oculomoteur de l'opérateur (i.e., fixations et saccades) et dans la charge mentale (i.e., dilatation des pupilles). En revanche, le temps de cycle semblait être plus long pour le système hybride, donc la performance de production était moins importante avec le cobot qu'avec l'humain. Cependant, en raison d'un effectif très faible dans

cette étude (i.e., cinq participants), les résultats ne peuvent pas être généralisés pour une population plus importante. Une étude similaire avec un effectif plus important permettrait de généraliser ces résultats avec une puissance statistique plus importante. Il a d'ailleurs été indiqué dans la littérature que la charge mentale liée au travail n'avait pas été autant investiguée que la charge physique du travail lors d'une collaboration humain-cobot (Cardoso et al., 2021 ; Storm et al., 2022).

Malgré une augmentation des études sur les collaborations humain-cobot ces dernières années (Cardoso et al., 2021), à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'ensemble des répercussions de l'introduction d'un cobot sur la performance collaborative et les comportements de l'opérateur, dans une situation déjà collaborative, passant d'un système humain à un système hybride. L'Etude 1 de ce travail de thèse aura pour objectif de comparer ces deux systèmes lors de la réalisation d'une tâche collaborative similaire.

4.1.2 La cadence : influence sur les sollicitations biomécaniques et les facteurs psychosociaux

La cadence est une des notions importantes pour décrire un poste de travail. Celle-ci peut se décrire par sa vitesse (i.e., tant de produits à fabriquer en tant de temps) mais aussi par son meneur (i.e., dans une collaboration humain-robot le meneur peut être l'humain ou le robot). Pollak et ses collaborateurs en 2020 ont rappelé la différence entre un cobot en automatique et un cobot en manuel. En fait, lorsque le cobot est en mode automatique, c'est lui qui initie les mouvements et l'humain se synchronise à lui ; le cobot est donc le meneur de la cadence. A l'inverse, lorsque le cobot est en mode manuel, chaque tâche est initiée par l'opérateur, notamment à l'aide d'un bouton ; l'humain est donc le meneur de la cadence. Modifier un des paramètres de la cadence pourrait donc avoir des répercussions sur la santé des opérateurs, notamment en termes de TMS.

Lorsqu'une cadence augmente, la fréquence des gestes à effectuer pour l'opérateur devient plus importante (Mathiassen & Winkel, 1996 ; Sundelin, 1993). La hausse d'activité de l'opérateur va nécessairement accroître ses sollicitations biomécaniques (Bao et al., 2016 ; Hoogendoorn et al., 2000 ; Petit et al., 2014). En revanche, les résultats concernant la gestion de la cadence sont contradictoires dans la littérature. En effet, pour certains, mener la cadence réduirait ces sollicitations (Bao et al., 2016) tandis que pour d'autres mener la cadence de production

accroîtrait les sollicitations (Dempsey et al., 2010). L'augmentation de ces sollicitations pourrait être liées à une cadence de travail plus importante lorsque celle-ci est menée par l'opérateur dans une cadence libre (Dempsey et al., 2010). En effet, dans cette étude les participants ont réalisé une tâche d'assemblage avec une machine. Dans une condition, ils devaient travailler au rythme de la machine pour fabriquer trente-six produits en trente minutes. Dans l'autre condition, les participants menaient la cadence avec l'objectif de fabriquer un maximum de produits en trente minutes, dans un rythme qui pourrait être maintenu pendant une journée de travail sans ressentir d'inconfort dans les articulations de la nuque, des épaules, des coudes et des poignets.

Les sollicitations biomécaniques ne sont pas les seuls facteurs de risque d'apparition des TMS, plusieurs facteurs psychosociaux peuvent également être responsables. Une forte cadence de travail augmente le sentiment de fatigue physique chez l'opérateur (Bao et al., 2016). Lorsque la machine mène la cadence de production, les opérateurs semblent moins recommander leur travail et sont moins satisfaits que ceux qui mènent cette cadence (Bao et al., 2016). De plus, laisser le cobot mener la cadence revient à donner la prise de décision au cobot plutôt qu'à l'humain. Cette perte de prise de décision pour l'opérateur peut engendrer des réactions cognitives négatives ou du stress (Gombolay & Shah, 2014 ; Stein et al., 2019), et cette autonomie du cobot peut également être perçue comme effrayante pour l'opérateur (Złotowski et al., 2017).

Ainsi, une cadence trop importante semble augmenter les sollicitations biomécaniques sur l'opérateur tout en dégradant ses facteurs psychosociaux. En revanche, même si mener la cadence semble bénéfique sur le plan psychosocial de l'opérateur, la gestion de la cadence pose encore questions concernant les contraintes biomécaniques subies par celui-ci. L'Etude 2 de ce travail de thèse aura pour objectif d'analyser les différences de plusieurs rythmes de cadence de production et de différents meneurs de cette cadence.

4.1.3 Problématique générale du travail de thèse

Les robots collaboratifs sont présentés comme une technologie permettant de travailler avec des opérateurs humains dans un environnement de travail partagé pour réaliser une tâche commune. Ces cobots sont mêmes décrits comme une bonne solution pour réduire la demande

physique d'une tâche pour l'opérateur lorsque cette tâche est trop complexe à automatiser (Maurice et al., 2017), participant à la prévention des TMS (El Makrini et al., 2019). Cependant, l'introduction du cobot peut également avoir des répercussions négatives si celle-ci est inadaptée (Brun & Wioland, 2021).

Ainsi, l'introduction des cobots dans les situations de travail engendre un nouvel intérêt dans les recherches scientifiques (Cardoso et al., 2021), et notamment concernant leurs répercussions sur les performances de production et sur les facteurs humains. Des études récentes ont montré que travailler avec un cobot réduisait les contraintes biomécaniques sans réduire la performance de production comparativement à une situation de travail individuelle (Colim et al., 2021; Gualtieri, Palomba, et al., 2020). Cependant, ces améliorations sont-elles dues au fait de travailler avec un cobot ou à la réduction du nombre de tâches à effectuer, certaines sous-tâches étant redistribuées au cobot et non plus à l'opérateur ? Malgré une cadence de production identique, le temps de travail effectif de l'opérateur diminue, engendrant des temps de pause supplémentaires et pouvant être considérés comme des temps de récupération pour lui. Donc cette réduction des contraintes biomécaniques pourrait être liée à cette réduction du temps de travail effectif de l'opérateur. Avec un temps de travail effectif similaire face au cobot, seul ou face à un co-travailleur humain, ces contraintes biomécaniques seraient-elles diminuées pour l'opérateur ?

Dans la littérature, les articles se sont principalement intéressés à l'ergonomie physique lors de l'introduction d'un cobot par rapport à l'ergonomie cognitive. En effet, près de trois quarts des articles étudiés dans la revue de littérature de Cardoso et ses collaborateurs (2021) concernaient l'ergonomie physique parallèlement à un quart traitant de l'ergonomie cognitive. De plus, ces études ne combinaient pas les mesures des deux types d'ergonomie. Une autre limite peut être soulevée dans ces études : l'échantillon n'était pas très élevé, au maximum vingt participants et dans la plupart de celles-ci n'excédant pas les dix participants (Cardoso et al., 2021).

A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à comprendre comment et pourquoi le fait de travailler face à un cobot pourrait diminuer les contraintes biomécaniques de l'opérateur sans dégrader les performances de travail.

Ainsi, ce travail de thèse avait pour objectifs généraux d'étudier les différents facteurs humains d'un opérateur lors de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail collaboratif mais aussi de créer une amorce de trame d'évaluation d'une interaction humain-robot regroupant un

maximum de facteurs humains pouvant être influencés par la présence d'un cobot dans son environnement. Ces travaux sont composés de deux études (Etude 1 et Etude 2).

4.2 Choix de la tâche : une tâche en laboratoire inspirée de situations réelles

Pour introduire un cobot dans une situation de travail, il est nécessaire d'analyser et d'identifier cette situation pour optimiser les performances de l'opérateur et du cobot. Dans ce travail de thèse, nous avons défini une tâche collaborative qui peut être effectuée soit par un système humain soit par un système hybride sur le même plan de travail. Cette situation de travail a été utilisée pour les deux Etudes.

Tout d'abord, le cobot doit être en mesure de réaliser les sous-tâches qu'il aura à effectuer. En effet, en raison de certaines normes et capacités, certains cobots ne peuvent pas réaliser certaines tâches : force trop importante à produire, tâche trop précise (e.g., nécessitant une certaine motricité fine pour être précis). Certains cobots peuvent assister l'opérateur pour soulever une charge lourde tandis que d'autres cobots sont contraints à une charge limitée. Ainsi, il est important de choisir le cobot à utiliser pour réaliser une tâche collaborative selon ses capacités et les besoins de la tâche.

Ensuite, le cobot peut effectuer un travail collaboratif avec des humains car le système hybride le permet, avec des interactions entre les cobots et les humains dans un espace de travail partagé (Shravani & Rao, 2018b). Ainsi, la présence d'humain(s) dans la tâche de travail est nécessaire pour avoir une collaboration physique avec le cobot. Il faut donc répartir les tâches entre le cobot et l'humain avec plusieurs objectifs : que les tâches attribuées au cobot soient réalisables, que l'humain n'ait pas de tâches trop contraignantes biomécaniquement et que ce dernier ait suffisamment de tâches à effectuer pour ne pas être trop à l'arrêt.

Ainsi, pour les deux Etudes de ce travail de thèse, nous avons choisi une tâche d'usinage, de type travail à la chaîne, qui correspond à une situation réelle dans laquelle un cobot pourrait être introduit. Celle-ci correspond à une tâche d'assemblage d'un produit où l'opérateur et le cobot effectuent des actions de manière sérielle. Le cobot effectue des tâches de charge-décharge avec des déplacements de composants tandis que l'humain effectue des tâches nécessitant une motricité fine que le cobot ne pourrait pas réaliser. L'humain et le cobot

travaillent sur le même plan de travail avec des espaces définis pour chacun mais aussi un espace commun permettant une collaboration physique entre les deux.

4.3 Evaluation d'une HRI : analyse multidimensionnelle pour l'optimiser

Comme vu précédemment, il est nécessaire d'évaluer la tâche collaborative dans son ensemble pour la valider tant du point de vue de la production que d'un point de vue ergonomique pour l'opérateur. La Figure 22 présente les différentes dimensions à prendre en compte chez l'opérateur pour évaluer une HRI, la liste n'étant pas exhaustive ici. Concernant l'ergonomie du poste de travail, il ne faut pas s'intéresser uniquement à l'ergonomie physique mais aussi à l'ergonomie cognitive (Cardoso et al., 2021). En effet, des contraintes physiques trop importantes risqueraient de dégrader les capacités cognitives de l'opérateur, et des contraintes mentales trop importantes pourraient dégrader la santé physique de l'opérateur par une augmentation des contraintes biomécaniques par exemple (Cardoso et al., 2021 ; Segura Parra et al., 2020).

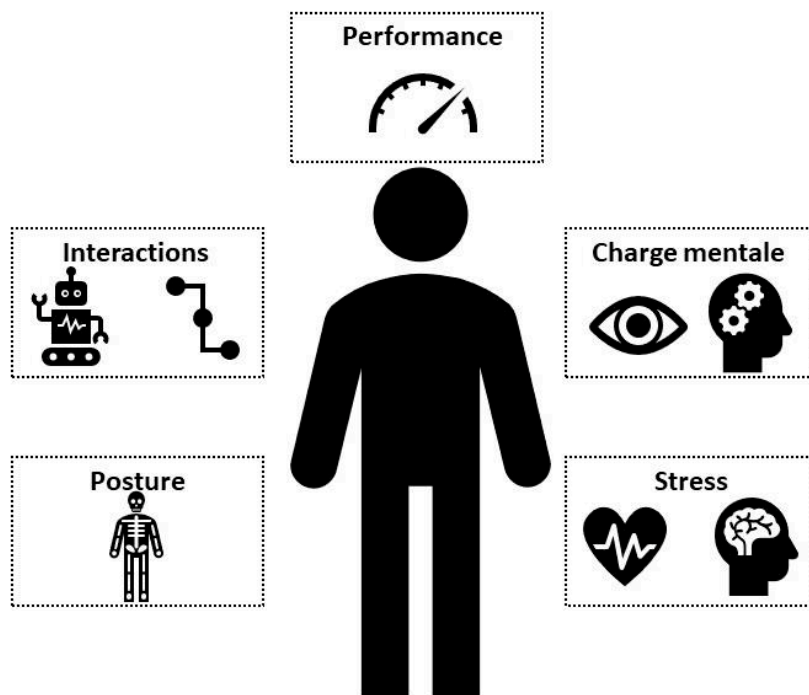


Figure 22 : Dimensions de l'opérateur pour une évaluation d'une HRI (liste non exhaustive)

4.3.1 La performance de l'opérateur au service de la production

La réalisation d'une tâche de travail répond à des objectifs de production. En effet, dans un contexte écologique, l'opérateur est soumis au respect d'une production donnée, en menant la cadence ou en la subissant (Bao et al., 2016).

Dans la tâche de travail collaborative de ce travail de thèse, le processus de fabrication aboutit à un produit fabriqué, correspondant aux sorties (Hill, 2017). Comme mentionné précédemment (cf., 1.5.3 La productivité), nous allons nous intéresser à la production, définie comme le nombre de produits fabriqués, et à l'efficacité de production, définie comme le nombre de produits fabriqués par rapport au nombre de produits attendu (Hill, 2017).

4.3.2 Les interactions entre les co-travailleurs du système : leur fluidité

Du fait de la proximité physique entre les co-travailleurs humain et cobot, grâce aux différentes normes qui régissent ce dernier, de nouvelles interactions sont possibles entre l'opérateur humain et le cobot. Ainsi, les co-travailleurs réalisent leurs sous-tâches avec une répartition spatiale et temporelle, dans le but de performer dans la tâche avec un but commun. En s'appuyant sur la taxonomie des interactions entre humain et robot d'Hentout et ses collaborateurs (2019), les interactions avec le cobot dans notre situation de travail peuvent être définies comme des coopérations et des collaborations puisqu'ils partagent un but commun, dans la réalisation d'une tâche commune, dans un espace de travail commun.

Les interactions entre les co-travailleurs peuvent être évaluées par leur fluidité. Pour mesurer cette fluidité, nous nous appuyons sur les travaux d'Hoffman en 2019 (cf., 1.4.2.1 La fluidité de l'interaction : comment la mesurer ?). Dans les Etudes 1 et 2, pour évaluer ces interactions, le travail collaboratif entre les co-travailleurs est filmé puis codé suivant le codage d'Hoffman (2019). Ainsi, les actions des différents co-travailleurs sont mesurées ainsi que leurs interactions.

4.3.3 La posture de l'opérateur humain : les TMS comme conséquence d'une posture à risque

La santé des opérateurs est une des préoccupations majeures au niveau industriel, avec notamment les TMS qui affectent particulièrement leurs membres supérieurs et leur tronc (L'Assurance Maladie, 2021). Les TMS ont des causes plurifactorielles, dont les sollicitations biomécaniques qui sont considérées comme étant centrales dans l'apparition des TMS (Uguen et al., 2018).

Les risques d'apparition des TMS peuvent être évalués par la posture de l'opérateur. Nous avons vu précédemment qu'il existe différentes méthodes d'évaluation des risques d'apparition des TMS. Nous avons choisi l'évaluation RULA (McAtamney & Corlett, 1993) car celle-ci est la plus utilisée dans la littérature (Cardoso et al., 2021 ; Misslin et al., 2021) mais aussi la plus adaptée à la tâche de travail des Etudes 1 et 2.

Les mesures de la posture des participants dans ce travail de thèse s'effectuent avec un système inertiel de motion capture. Ce système présente les avantages de mesurer avec une grande précision et sans risque d'occlusion, qui occasionnerait une perte de données pendant les mesures.

4.3.4 La charge cognitive : autre facteur de risques des TMS

Les sollicitations biomécaniques ne sont pas les seules causes de l'apparition des TMS chez les opérateurs. En effet, il a été montré qu'une forte charge cognitive peut également être à l'origine de TMS (Bongers et al., 2006 ; Josephson et al., 1997 ; Petit et al., 2014).

La charge cognitive peut être étudiée de manière objective (par des mesures physiologiques ou par l'ajout d'une seconde tâche) et subjective (par un questionnaire). Ces deux méthodes sont utilisées dans ce travail de thèse avec l'usage d'un oculomètre, l'ajout d'une seconde tâche et la proposition du remplissage d'un questionnaire, le NASA-TLX (Hart, 2006).

L'oculomètre permet d'enregistrer le comportement oculomoteur de l'opérateur par les mouvements des yeux, et renseigne également sur la charge cognitive avec la dilatation des pupilles. Une seconde tâche est à réaliser par les participants simultanément à la tâche collaborative avec le co-travailleur pour mesurer la demande attentionnelle de la tâche

collaborative. Enfin, le NASA-TLX est un questionnaire qui évalue subjectivement la charge de travail du participant dans la réalisation de la tâche collaborative à travers six dimensions de la charge cognitive. Le NASA-TLX est l'outil le plus utilisé, avec les entretiens, pour évaluer la charge de travail d'opérateurs dans une HRI (Cardoso et al., 2021).

4.3.5 Stress de l'opérateur : une réponse psycho-physiologique face à une situation

Face à une situation de travail et dans un environnement collaboratif, l'opérateur peut ressentir cette situation comme étant stressante. Un stress élevé peut modifier les comportements de l'opérateur en diminuant ses performances ou ses ressources attentionnelles disponibles pour la tâche par exemple.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer ce stress, même si aucune méthode n'est actuellement standardisée (H.-G. Kim et al., 2018). Une des méthodes les plus répandues est l'étude de l'activité cardiaque. En effet, une situation stressante augmente la fréquence cardiaque, mais aussi et surtout la variabilité de la fréquence cardiaque (H.-G. Kim et al., 2018). Ainsi, un électrocardiogramme est utilisé pour mesurer la fréquence cardiaque des participants, donc indirectement une de ses réponses au stress.

4.3.6 Autres dimensions de l'opérateur

Les différentes dimensions énoncées précédemment (i.e., performance, interactions, posture, charge cognitive et stress) ne sont pas exhaustives pour évaluer une HRI. En effet d'autres dimensions telles que l'expérience de l'opérateur et son acceptabilité et acceptation du cobot par exemple peuvent être étudiées pour évaluer la situation de travail collaborative. La confiance envers le cobot est également une mesure importante pour une HRI optimale : une mauvaise confiance pourrait augmenter la charge de travail de l'opérateur et dégrader les performances (Sadrfaridpour et al., 2016)

Cependant, puisque les expérimentations de ce travail de thèse se font en laboratoire et non en entreprise avec une réelle situation de travail comprenant des opérateurs, ces dimensions étaient moins pertinentes à évaluer dans ce travail.

4.4 Objectifs du travail de thèse

Ce travail de thèse est composé de deux études dans le but d'évaluer l'impact de la situation collaborative lors de l'introduction d'un cobot sur les différents facteurs humains d'un opérateur.

4.4.1 Etude 1 : performances de production et facteurs humains des opérateurs pour un système humain et un système hybride

La première étude de ce travail (Etude 1) avait deux objectifs.

Le premier était de comparer la même situation de travail collaborative entre un système humain (i.e., deux humains) et un système hybride (i.e., un humain et un cobot) en termes de performances de production, d'interactions entre les travailleurs et sur les facteurs humains, correspondant à des facteurs de risques d'apparition de TMS. Dans cette Etude 1, les facteurs humains étudiés sont les sollicitations biomécaniques par le biais de la posture et la charge cognitive par le biais des ressources attentionnelles et du comportement oculomoteur.

Pour ce premier objectif de l'Etude 1, nous émettons l'hypothèse suivante : la présence du co-travailleur cobot (i.e., système hybride) en comparaison à la présence du co-travailleur humain augmente la productivité et les interactions et diminue les risques d'apparition de TMS pour le travailleur humain (avec une diminution des sollicitations biomécaniques, de la demande attentionnelle et une modification de l'exploration visuelle).

Le second objectif était d'analyser les répercussions de deux niveaux de difficulté d'une seconde tâche cognitive dans une interaction humain-cobot en termes de performances de production, d'interactions entre les travailleurs et sur les facteurs humains, correspondant aux mêmes facteurs que pour l'objectif précédent.

Pour ce second objectif de l'Etude 1, nous émettons l'hypothèse suivante : une seconde tâche difficile, effectué par le travailleur humain en parallèle de sa tâche principale lors d'une interaction humain-cobot, en comparaison à une seconde tâche plus facile, diminue la productivité et les interactions mais augmente les risques d'apparition de TMS pour le travailleur humain (avec une augmentation des sollicitations biomécaniques, de la demande

attentionnelle et une modification de l'exploration visuelle). L'hypothèse d'interaction nous intéressait plus particulièrement, et était formulée ainsi : la différence entre les deux niveaux de difficulté de la tâche secondaire est plus importante dans la situation hybride, révélant une diminution des ressources cognitives disponibles face au cobot comparé à face à un humain.

4.4.2 Etude 2 : performances de production et facteurs humains des opérateurs pour un système hybride à différentes cadences de production

La seconde étude de ce travail (Etude 2) avait également deux objectifs.

Le premier objectif était d'analyser les répercussions de plusieurs vitesses de cadence imposée au travailleur humain dans une interaction humain-cobot (i.e., lorsque le cobot mène la cadence) en termes de performances de production, d'interactions entre les travailleurs du système hybride et sur les facteurs humains, correspondant à des facteurs de risques d'apparition de TMS. Dans cette Etude 2, les facteurs humains étudiés sont les sollicitations biomécaniques par le biais de la posture, la charge cognitive par le biais des ressources attentionnelles et de la charge de travail perçue, et le stress par le biais de la fréquence cardiaque.

Pour ce premier objectif de l'Etude 2, nous émettons l'hypothèse suivante : l'augmentation d'une cadence imposée par le cobot dans une situation de travail collaborative d'un système hybride augmente la productivité, les interactions et les risques d'apparition de TMS pour le travailleur humain (avec une augmentation des sollicitations biomécaniques, de la demande attentionnelle, de la charge de travail perçue et du stress).

Le second objectif était d'analyser les répercussions du fait de mener la cadence ou de la suivre (i.e., lorsqu'elle est menée par le cobot), à une vitesse de cadence théorique similaire, dans une interaction humain-cobot en termes d'efficacité de production, d'interactions entre les travailleurs du système hybride et sur les facteurs humains, correspondant aux mêmes facteurs que pour l'objectif précédent.

Pour ce second objectif de l'Etude 2, nous émettons l'hypothèse suivante : le fait d'être le meneur de la cadence, par rapport au fait d'en être le suiveur, augmente l'efficacité de production et les interactions mais diminue les risques d'apparition de TMS pour le travailleur

humain (avec une réduction des sollicitations biomécaniques, de la demande attentionnelle, de la charge de travail perçue et du stress).

5 ETUDE 1 : COMPARAISON DE LA PERFORMANCE ET DES FACTEURS HUMAINS ENTRE UN SYSTEME HUMAIN ET UN SYSTEME HYBRIDE REALISANT LA MÊME TÂCHE COLLABORATIVE

L'introduction de cobots dans une situation de travail est présentée comme une solution permettant de réduire les risques de développer des TMS sans dégrader la productivité de ce poste. Ces améliorations ergonomiques ont déjà été observées lors d'une transition d'une situation de travail individuelle à une situation de travail collaborative (Colim et al., 2021 ; Gualtieri, Palomba, et al., 2020) . En revanche, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à comprendre comment et pourquoi le fait de travailler face à un cobot pourrait diminuer les contraintes biomécaniques de l'opérateur sans dégrader les performances de travail.

Pour rappel, cette Etude 1 avait deux objectifs principaux. Le premier était de comparer la même situation de travail collaborative entre un système humain (i.e., humain-humain) et un système hybride (i.e., humain-cobot) en termes de performances de production, d'interactions entre les travailleurs et des facteurs humains. Le second était d'analyser les répercussions de deux niveaux de difficulté d'une seconde tâche cognitive dans une interaction humain-cobot sur les mêmes variables.

Deux hypothèses ont été émises pour cette Etude 1.

Hypothèse 1 : Comparé à travailler face à un humain, quand les participants seront face à un cobot : ils fabriqueront plus de produits (productivité), auront plus d'interactions de haut niveau (qualité des interactions), auront une meilleure posture avec un risque TMS associé moins important (sollicitations biomécaniques), auront davantage d'erreurs à la seconde tâche (ressources attentionnelles), auront un diamètre pupillaire plus grand (charge attentionnelle) et auront des durées de fixation et des amplitudes de saccades différentes (exploration visuelle).

Hypothèse 2 : Comparé à lorsque la tâche secondaire auditive est plus facile, quand les participants doivent réaliser une tâche secondaire difficile : ils fabriqueront moins de produits (productivité), auront moins d'interactions de haut niveau (qualité des interactions), auront une moins bonne posture avec un risque TMS associé plus important (sollicitations biomécaniques), auront davantage d'erreurs à la seconde tâche (ressources attentionnelles), auront un diamètre

pupillaire plus grand (charge attentionnelle), auront des durées de fixation et des amplitudes de saccades différentes (exploration visuelle), et ceci d'autant plus quand ils seront face à un cobot plutôt que face à un humain.

5.1 Méthode

5.1.1 Participants

Une population de 34 personnes volontaires, entre 18 et 30 ans est recrutée ($22,1 \pm 2,0$ ans, 21♂ et 13♀). Ils ne présentent ni déficience affectant le contrôle moteur ni le comportement attentionnel et ne portent pas de lunettes. La population recrutée est étudiante, et non des opérateurs. Ainsi les participants ne sont pas familiers du travail en contact avec des robots/cobots.

Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant leur participation.

5.1.2 Matériel et tâches

5.1.2.1 La tâche motrice : fabrication de produits en collaboration

5.1.2.1.1 Objectif de la tâche et processus de fabrication

Durant l'expérimentation, les participants réalisent une tâche motrice, dans laquelle ils doivent fabriquer un maximum de produits pendant quatre minutes, en collaboration avec un co-travailleur, sur un plan de travail collaboratif (Figure 23B). Les produits (Figure 23A) sont issus de la plateforme de recherche Progress 4.0 au niveau de l'AIP Lorrain (Atelier Inter-établissement de Production, Villers-lès-Nancy, France). Le produit, d'une masse de cent-quarante grammes une fois fini, est composé d'un carénage imprimé en 3D (celui-ci possède une nervure dans sa partie intérieure), d'un produit SFP (Système Flexible de Production) en aluminium (qui sont deux morceaux préalablement imbriqués, possédant une rainure), d'un couvercle et de trois vis et trois écrous.

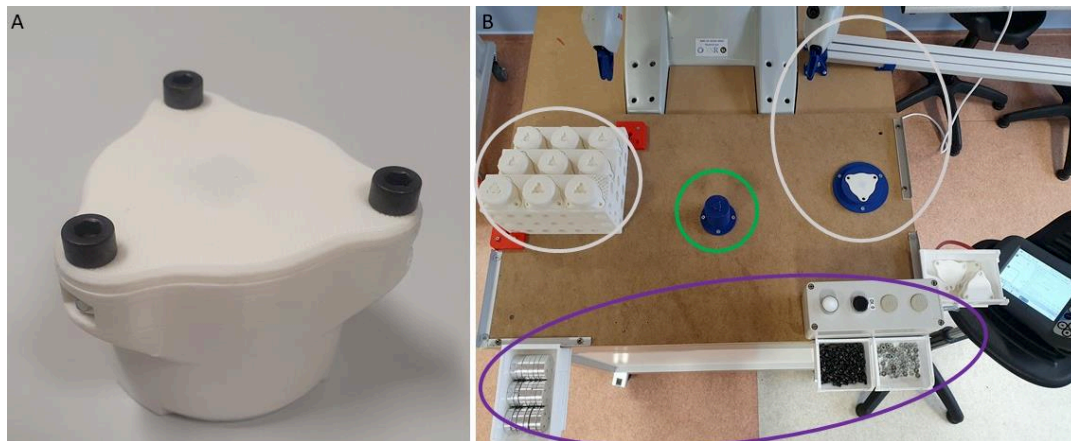


Figure 23 : A/ Produit fini ; B/ Vue supérieure du plan de travail, zone co-travailleur pour les cercles gris clair, zone participant pour le cercle violet et zone collaborative pour le cercle vert

Le participant et le co-travailleur ont des sous-tâches prédéfinies dans le processus de fabrication. Ces différentes étapes de production sont montrées dans la Figure 24. Tout d'abord, le co-travailleur déplace le carénage au niveau du socle central et le participant y introduit le produit SFP avant que le co-travailleur dépose le couvercle sur cet ensemble. Ensuite, le participant insère un écrou et une vis dans les espaces du carénage qui lui font face puis le visse manuellement. Le co-travailleur prend le produit et le tourne de 120° à deux reprises tandis que le participant effectue la même action de vissage après chaque rotation. Lorsque le produit est entièrement fini, le co-travailleur saisit le produit et le dépose sur la rampe d'évacuation. Enfin, le participant et le co-travailleur répètent ces opérations pour fabriquer les produits suivants. Le participant doit « recharger » le couvercle à n'importe quel moment de la fabrication, avant que le co-travailleur ne vienne chercher le couvercle suivant.

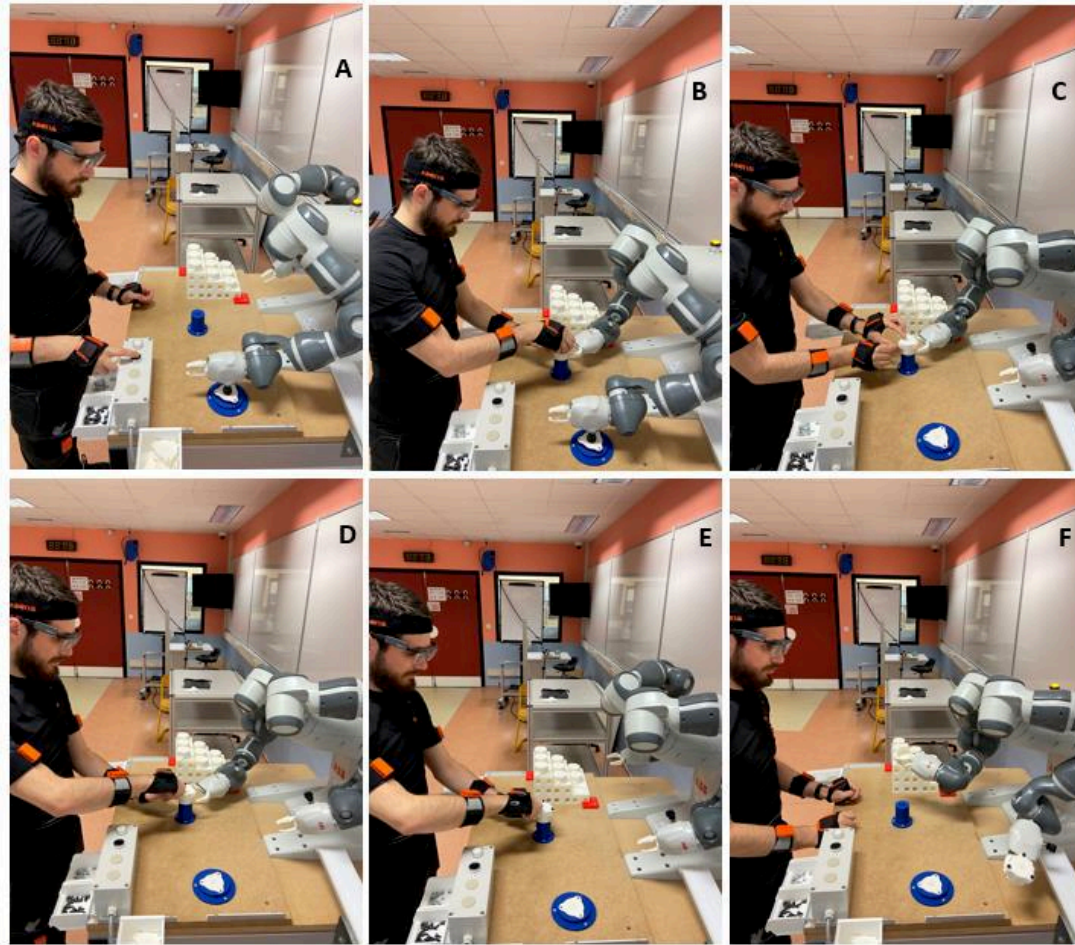


Figure 24 : Processus de fabrication du produit, avec à gauche du plan de travail dans cette vue, la place du participant, et à droite celle du co-travailleur, ici le cobot. A/ le cobot est en attente de l'instruction du participant ; B/ le participant dépose le produit SFP dans le carénage qui a été déposé par le cobot sur le socle central ; C/ le participant visse un premier coup ; D/ le participant visse une seconde fois après la rotation du produit de 120° effectuée par le cobot ; E/ le participant visse une troisième et le produit est désormais fini ; F/ le cobot évacue le produit et amène le prochain carénage.

Le processus de fabrication du produit s'effectue sur un plan de travail collaboratif. Celui-ci se situe entre le participant et le co-travailleur. Il se décompose en trois zones : la zone « co-travailleur », proche de celui-ci et réservée à ses actions (cercles gris clair dans la Figure 23B) ; la zone « participant », proche de celui-ci et réservée à ses actions (cercle violet dans la Figure 23B) ; la zone « collaborative » qui est une zone d'interaction au centre du plateau, au niveau du socle collaboratif (cercle vert dans la Figure 23B), dans laquelle le participant et le co-travailleur agissent et interagissent. Les socles présents sur le plan de travail ont été imprimés en trois dimensions avec une imprimante 3D Pro2 (Raise 3D, Californie, États-Unis). Autour du plan de travail sont accrochées des boîtes en plastique pour stocker les différents composants des produits.

Pour un placement ergonomique optimal du participant, la hauteur du plan de travail doit être à une hauteur inférieure de cinq à dix centimètres par rapport à la hauteur du coude du participant (CUSSTR, 2005). Pour pallier le différentiel dans les cas non échéant, des plaques de polystyrène extrudé de 125mm sur 60mm, d'une hauteur de 20mm, sont placés sous le participant pour le rehausser.

A la fin d'un essai, l'expérimentateur, qui supervise les passations, contrôle les produits finis en vérifiant leur vissage afin de valider la série uniquement si tous les produits sont correctement vissés (i.e., en retournant le produit celui-ci ne doit pas s'ouvrir et aucune vis ne doit tomber). Pour chaque essai, le nombre de produits fabriqués est compté, et pour le dernier produit en cours, le nombre d'étapes est également compté. L'objectif de cette tâche est de fabriquer un maximum de produits en quatre minutes.

5.1.2.1.2 Le co-travailleur : cobot ou humain

Comme mentionné précédemment, la tâche motrice s'effectue en collaboration avec un co-travailleur. Celui-ci est soit un cobot (modalité COB) soit un autre humain (modalité HUM).

Dans la modalité COB, le cobot est un cobot YuMi (ABB Group, Zurich, Suisse ; voir Figure 25). Celui-ci est équipé de deux bras indépendants, avec sept points d'articulations chacun. Les deux bras sont équipés à leur bout de pinces, imprimées en trois dimensions et de plus seul le bras gauche est équipé d'une ventouse au niveau du « poignet ». Pendant la collaboration, la cadence de production est menée par le participant. Celle-ci est libre, sachant que la consigne était de fabriquer un maximum de produits pendant les quatre minutes. A l'aide d'un boîtier, le participant donne la commande au cobot de débiter sa prochaine sous-tâche.



Figure 25 : Le cobot YuMi

Le cobot est situé dans les locaux de l'AIP Lorrain. La programmation du cobot s'est appuyée sur un programme présent au préalable (Projet Progress) et a été modifiée pour son utilisation dans l'expérience. Le cobot est en vitesse dite « automatique », ainsi la vitesse de mouvement de ses bras est limitée à 1,5m/s. Cette vitesse a été choisie pour être optimale pour les sous-tâches du cobot, entre vitesse et précision pour éviter des problèmes rencontrés liés à une vitesse trop importante.

Dans la modalité HUM, le co-travailleur est un humain. Celui-ci est le même pour tous les participants. Ses sous-tâches ont été apprises en amont des expérimentations et le co-travailleur humain s'est entraîné pour travailler à la même vitesse quelle que soit la vitesse du participant. Il a également adopté une coordination réactive (Huang et al., 2015), comme le cobot : ne pas anticiper les actions du participant, débiter ses actions uniquement lorsque le participant a terminé la sienne. L'objectif de l'apprentissage de cette sous-tâche et de la coordination réactive était de rendre la modalité HUM la plus similaire possible de la condition COB. De plus, la communication verbale entre les participants et le co-travailleur humain est interdite. La tâche auditive, qui va être détaillée plus tard, permet de contrôler cette absence de communication verbale.

Pour évaluer les performances à la tâche motrice, le nombre de produits fabriqués, avec l'étape du dernier produit en cours d'assemblage, est compté après chaque essai.

5.1.2.2 La tâche auditive : la tâche secondaire

Les participants effectuent une double tâche pendant les expérimentations, une tâche motrice décrite précédemment, et une tâche auditive décrite ci-dessous qui est la tâche secondaire. Le protocole de la double tâche permet d'évaluer la charge cognitive. Cette tâche secondaire auditive est une tâche auditivo-verbale, ainsi les modalités sensorielles diffèrent de ceux de la tâche motrice, qui est visuomotrice. Ce choix a été fait pour éviter des interférences liées à des entrées sensorielles et des sorties motrices identiques (Bardy, 1991).

Cette tâche auditive est inspirée de celle de l'expérience de Richer et Lajoie (2019). Les participants écoutent un enregistrement audio d'une série de lettres phonétiquement proches (B, D, P et T) annoncées de manière aléatoire avec un casque sans fil SoundLink II (Bose, Framingham, MA, United States of America). Pour créer les enregistrements, les sons de chaque lettre ont été enregistrés une fois, prononcée par une orthophoniste. Ensuite, douze séries de lettres ont été générées aléatoirement sur le logiciel Microsoft Excel 2019, puis les enregistrements ont été créés par le logiciel MATLAB R2020a. Pour chaque essai, l'enregistrement audio et la lettre à compter diffèrent pour éviter une mémorisation de la part du participant. Ainsi, les participants n'entendent pas deux fois la même série tout au long de l'expérience, tandis que la lettre prédéterminée est toujours différente entre deux essais à la suite et est choisie de manière aléatoire entre les trois autres lettres, en effectuant trois essais avec chaque lettre au total. Le participant n'est pas autorisé à utiliser ses doigts pour compter, maximisant ainsi l'effort cognitif (Richer & Lajoie, 2019).

L'objectif de cette tâche pour le participant est de compter le nombre d'occurrences d'une lettre prédéfinie dans un enregistrement (e.g., compter le nombre de P dans la séquence suivante : P, B, T, P, ..., B, P). L'enregistrement débute en même temps que la tâche motrice. En effet, lorsque le participant appuie sur le boîtier pour débiter sa tâche motrice, le superviseur déclenche la tâche auditive. Les enregistrements audios durent quatre minutes, à la fin de ceux-ci, le participant est informé de la fin des tâches, il doit ainsi indiquer à haute voix son compte d'apparition de la lettre prédéterminée. Le participant ne bénéficie pas de feedback sur sa réponse, ainsi sa motivation n'est pas influencée par la connaissance du résultat (Atkinson, 1964 ; Bandura, 1986).

Cette tâche a deux niveaux de difficulté, définis par l'intervalle inter-stimulus (IIS) : le niveau « difficile » avec un IIS de deux secondes (modalité 2s), chaque lettre est séparée d'un temps

de deux secondes, l'enregistrement compte cent-vingt lettres ; le niveau « facile » avec un IIS de cinq secondes (modalité 5s), chaque lettre est séparée d'un temps de cinq secondes, l'enregistrement compte quarante-huit lettres. La caractérisation facile/difficile s'appuie sur les résultats de l'expérience de Richer et Lajoie (2019).

Deux variables sont mesurées pour évaluer la performance à la tâche auditive : d'une part, il s'agit du taux de réussite (i.e., nombre d'essais avec la bonne réponse sur le nombre d'essais total) ; d'autre part, l'erreur absolue entre la réponse du participant et la bonne réponse est calculée (i.e., de combien il s'est trompé).

5.1.2.3 Le codage vidéo pour décrire les interactions entre les participants et le co-travailleur

Les passations s'effectuent dans la salle 105 de l'AIP Lorrain. Chaque essai est filmé à l'aide d'une caméra QFHD Pro Series à 15Hz (Dahua, Hangzhou, Chine) posée sur le mur. Les enregistrements vidéo sont exportés à partir du logiciel Smart PSS 1.13.1. Ces vidéos sont ensuite importés dans le logiciel Captiv-L7000 2.3.18 (TEA, Vandœuvre-lès-Nancy, France).

Pour quantifier les actions du participant et du co-travailleur, un codage de leurs actions est effectué sur le logiciel Captiv-L7000 2.3.18 en s'appuyant sur le codage d'Hoffman (2019). Les actions du participant et du co-travailleur, humain comme cobot, sont codées à partir de la dichotomie « Inactivité » (i.e., aucune action pour le produit) et « Activité » (i.e., action sur le produit). Pour les actions du participant, il y a une subdivision supplémentaire comme dans l'article de Neumann et ses collaborateurs en 2006, avec soit une « Activité directe » (i.e., action sur le produit au niveau du socle central) aussi appelé « travail à valeur ajoutée » dans la littérature (Liker, 2004 ; Neumann et al., 2006) soit une « Activité indirecte » (i.e., action motrice en dehors du socle central). Les différentes actions de chacun, avec la nomination des différentes sous-tâches, sont décrites dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Actions du co-travailleur et du participant. En souligné la description des actions. En italique les sous-tâche pour chaque action.

	Inactivité	Activité	
		Directe	Indirecte
Co-travailleur	Aucune action sur le produit. <i>Attente.</i>	Action sur le produit au niveau du socle central <i>Déplacer le carénage ; Poser le couvercle ; Faire tourner le produit ; Evacuer le produit fini.</i>	
Participant	Aucune action sur le produit. <i>Attente.</i>	Action sur le produit <i>Introduire le produit SFP ; Insérer un écrou, une vis ; Visser.</i>	Action sur le produit en dehors du socle central <i>Prendre le produit SFP ; Prendre un écrou et une vis ; Recharger le couvercle.</i>

Pour chaque action du participant et du co-travailleur, le temps de ces actions est calculé en pourcentage du temps d'un essai (i.e., quatre minutes). De plus, le temps moyen d'une activité du co-travailleur ainsi que les temps moyens d'une inactivité et d'une activité directe du participant sont également mesurés.

A partir de l'article d'Hoffman (2019), nous proposons une distinction entre les différents types d'interactions basée sur les actions du participant et du co-travailleur (Figure 26). Lorsque les deux sont en « Inactivité » alors il n'y a aucune interaction, il s'agit d'un « Temps mort ». Quand un des deux est en « Activité » tandis que l'autre est en « Inactivité », nous parlons de « Coopération ». Lorsque les deux sont en « Activité » il s'agit d'une collaboration. De plus, si le co-travailleur est en « Activité » et le participant plus spécifiquement en « Activité directe », alors il s'agit d'une « Collaboration directe ». Pour chacune de ses interactions, leur temps est calculé en pourcentage du temps d'un essai.

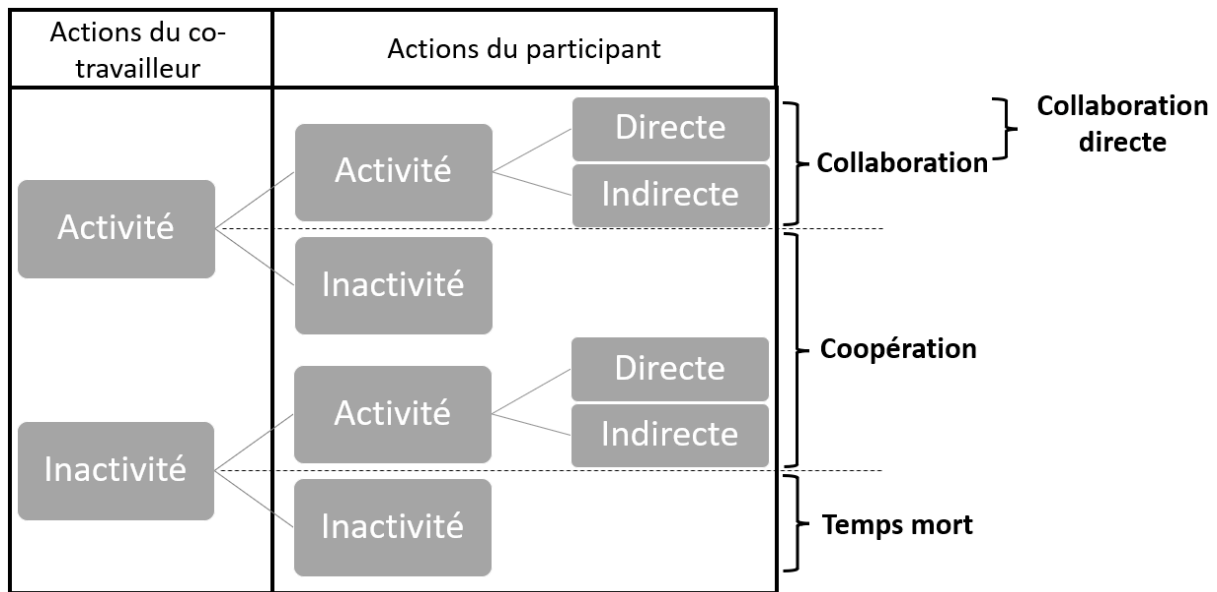


Figure 26 : Actions du co-travailleur et du participant et interactions entre le co-travailleur et le participant

5.1.2.4 La motion capture pour évaluer le risque de développer des TMS

Les participants sont équipés de dix-sept capteurs de mouvements de type centrales inertielle sans fil MVN BIOMECH Awinda enregistrant à 60Hz (Xsens, Enschede, Pays-Bas) comme présenté dans la Figure 27A. Ces différents capteurs sont placés sur la tête avec un bandeau, sur les épaules et le sternum à l'aide d'un gilet avec des scratchs, sur le pelvis, les bras, les avant-bras, les cuisses, les jambes et les pieds avec des bandes scratchs, et sur les mains avec des gants (Schepers et al., 2018). L'avatar représentant le participant en simultané sur le logiciel Xsens MVN est affiché sur la Figure 27B.



Figure 27 : A/ Centrales inertielles posées sur le corps d'un participant dans la modalité COB ; B/ Représentation de l'avatar sur le logiciel Xsens MVN

Les capteurs donnent les coordonnées de position de certains points dans les trois plans de l'espace ainsi que leur orientation en quaternion. A l'aide d'un modèle biomécanique intégré au logiciel Xsens MVN Animate Pro 2021.0.0 ainsi qu'un programme MATLAB, les données d'angle des articulations, ainsi que la position, la vitesse et l'accélération des segments corporels du participant dans les trois axes sont obtenues. Les segments mesurés sont au nombre de vingt-trois et sont détaillés dans le Tableau 2. Les données d'angle, de vitesse angulaire et d'accélération angulaire sont calculées avec MATLAB à partir de l'orientation de deux segments corporels. Les données d'angle sont transformées de quaternion pour obtenir des angles, en degré. Les différentes articulations sont présentées dans le Tableau 2 avec les deux segments utilisés.

Tableau 2 : Segments et articulations analysés par les logiciels Xsens MVN Analyse Pro 2021.0.0 et MATLAB

	Segments corporels	Articulations
Partie centrale (du plus caudal au plus crânial)	Pelvis ; Vertèbre L5 ; Vertèbre L3 ; Vertèbre T12 ; Sternum (T8) ; Nuque ; Tête	Dos : entre le pelvis et T8. Nuque : entre le segment de la nuque et la tête.
Membres supérieurs (du plus proximal ou plus distal)	Epaules ; Bras ; Avant-bras ; Main	Epaules : entre le segment épaule et le bras. Coudes : entre le bras et l'avant-bras. Poignet : entre l'avant-bras et la main.
Membres inférieurs (du plus proximal ou plus distal)	Cuisses ; Jambes ; Pieds ; Orteils	Hanche : entre le pelvis et la cuisse. Genou : entre la cuisse et la jambe. Cheville : entre la jambe et le pied.

A partir des données d'angle des articulations, une évaluation RULA est effectuée pour les deux côtés : gauche mêlant la partie centrale et le membre supérieur gauche ; droit mêlant la partie centrale et le membre supérieur droit. Nous avons vu précédemment comment s'effectuer l'évaluation RULA à partir des positions articulaires (cf., 2.5.3 La méthode RULA) tel qu'il est expliqué dans l'article de McAtamney et Corlett en 1993. Ainsi, un score RULA, compris entre 1 et 7, est obtenu en continu pendant l'essai (i.e., à chaque frame de la motion capture).

Pour chaque essai, un score RULA est moyenné à partir de l'ensemble des données des quatre minutes pour obtenir un score RULA moyen. Le pourcentage de temps passés pour chaque score RULA (i.e., r1, r2, r3, r4, r5, r6 et r7) est calculé pour un essai. Les scores obtenus pour les articulations de la partie centrale et des membres supérieurs (Tableau 2) à l'aide des tables RULA (cf., 2.5.3 La méthode RULA) sont également moyennés tout au long d'un essai. Les angulations moyennes des abductions des deux épaules, ainsi que des flexions des épaules, des coudes, des poignets, de la nuque et du dos sont calculées pour l'ensemble d'un essai. De plus, un score RULA est également calculé selon les différentes actions du participant.

5.1.2.5 L'oculomètre pour évaluer le comportement visuel

Des lunettes oculomètres Tobii Pro Glasses 2 à 25Hz (Tobii, Danderyd, Suède) sont également utilisées lors des expériences. Elles sont positionnées sur le participant comme des lunettes classiques, sont maintenues grâce à un cordon, et reliées à un boîtier qui est accroché au niveau

d'une poche du participant. Une caméra présente sur la face antérieure des lunettes enregistre la scène visuelle (Figure 28), tandis que quatre petites caméras tournées vers l'intérieur des lunettes filment les deux yeux du participant.



Figure 28 : Vision à la première personne de la scène visuelle d'un participant par les lunettes oculomètres.

Les enregistrements s'effectuent sur le logiciel Tobii Pro Glasses v.1.114, puis les données sont exportées avec le logiciel Tobii Pro Lab v.1.138. Les données sont filtrées avec un filtre I-DT (identification du seuil de dispersion) par le logiciel Tobii Pro Lab. Ainsi, la fixation est définie comme une stabilisation du regard pendant plus de 75ms dans un rayon inférieur à $0,5^\circ$ (Komogortsev et al., 2010). Les microsaccades, qui permettent de conserver le regard dans cette zone, ne sont pas comptabilisées comme des saccades. Ces dernières doivent être plus longues que 30ms et correspondent à un changement de point d'attention (Dzeng et al., 2016; Sodhi et al., 2002). L'oculomètre enregistre des données toutes les 40ms (soit une fréquence d'échantillonnage de 25Hz).

La position du regard dans la scène visuelle est évaluée par les fixations, notamment par leur nombre sur la totalité d'un essai, mais aussi par leur durée moyenne. Les mouvements du regard sont évalués par les saccades, par leur amplitude en degré ($^\circ$) et par leur vitesse (en $^\circ/s$). L'oculomètre renseigne également sur la dilatation des pupilles, qui est un indicateur de la charge cognitive (van der Wel & van Steenbergen, 2018). Ainsi, la donnée du diamètre des pupilles des deux yeux est mesurée en continu. Le diamètre pupillaire moyen de chaque œil est calculé pendant chaque essai, puis la valeur des deux yeux est moyennée pour obtenir la diamètre pupillaire moyen pour un essai.

Le coefficient K a été abordé précédemment. Ce coefficient permet de renseigner sur le comportement oculomoteur en indiquant si celui-ci est plutôt en mode focal ou en mode ambiant (Krejtz et al., 2017). Une approximation de ce coefficient K est calculée avec un programme MATLAB, où les données des amplitudes de saccade (du vrai coefficient) est ici remplacées par la distance entre deux fixations consécutives pour des raisons techniques.

5.1.3 Procédure

Dans cette expérimentation, les participants effectuent une double tâche, avec une tâche motrice de fabrication de produits et une tâche auditive de comptage d'occurrences d'une lettre prédéterminée dans une série de lettres dans un enregistrement audio. Le travail de fabrication de produits se décompose en deux conditions selon le co-travailleur : soit face au cobot YuMi soit face à un autre humain. La tâche auditive se décompose en deux conditions selon l'IIS : soit de deux secondes, soit de cinq secondes. L'ensemble des participants effectuent les deux modalités des deux tâches. Ainsi, ils effectuent les tâches dans quatre conditions différentes :

- COB2s : collaboration avec le cobot et IIS de deux secondes ;
- COB5s : collaboration avec le cobot et IIS de cinq secondes ;
- HUM2s : collaboration avec un humain et IIS de deux secondes ;
- HUM5s : collaboration avec un humain et IIS de cinq secondes.

Avant tout, à l'arrivée du participant, celui-ci donne son consentement écrit en signant un formulaire de consentement après avoir lu un document d'information résumant la méthodologie de l'expérimentation. Les différents matériels utilisés dans ce protocole sont montrés visuellement au participant en lui expliquant leurs rôles.

Le participant débute la phase d'équipement avec la motion capture. Tout d'abord, les différentes mesures anthropométriques sont effectuées puis indiquées dans le logiciel Xsens MVN Animate Pro 2021.0.0. Une fois les mesures terminées, il est équipé avec les dix-sept centrales inertielle sur les différentes parties du corps comme expliqué précédemment. Lorsqu'il est équipé, le participant effectue la calibration de la motion capture (Schepers et al., 2018). Il reste en N-pose (i.e., debout avec les deux bras le long du corps sur le côté, les paumes de la main face au corps) pendant deux secondes. Ensuite il marche sept pas face à lui à une

allure « normale » et effectue un demi-tour à la fin des pas pour revenir se positionner comme au départ, en N-pose, pour environ une quinzaine de secondes, le temps de la fin de la calibration.

Lorsque l'équipement et la calibration de la motion capture sont terminés, le participant est placé face au plan de travail collaboratif, face au cobot. Il bénéficie de trois phases d'apprentissage. Aucune performance ou réussite n'est nécessaire pour terminer ces différentes phases.

La première phase concerne la tâche motrice en simple tâche. L'objectif de la tâche lui est indiqué (i.e., fabriquer un maximum de produits en quatre minutes) puis une description verbale des différentes étapes de fabrication lui est faite. Ensuite, le participant se positionne face au cobot et fabrique en collaboration avec celui-ci au minimum six produits, et plus si le participant le souhaite, pour se familiariser avec les différentes étapes de fabrication. Pour les deux premiers produits, le superviseur se positionne à côté du participant et le guide oralement pour les différentes étapes de fabrication, puis il se positionne en dehors du champ de vision du participant et le laisse continuer en autonomie.

La deuxième phase concerne la tâche auditive en simple tâche. Celle-ci est expliquée verbalement au participant, avant de faire un essai de la tâche auditive dans la modalité 5s (i.e., avec un intervalle inter stimulus de cinq secondes). A la fin des quatre minutes, il indique le nombre de fois qu'il a entendu la lettre qui a été demandée au préalable, puis il bénéficie d'un feedback pour avoir connaissance du résultat cette fois-ci.

Enfin, le participant bénéficie d'une phase d'apprentissage en double tâche. Le participant se positionne face au cobot pour fabriquer les produits et effectue la tâche auditive simultanément avec un intervalle inter stimulus de cinq secondes. Ainsi le participant effectue son apprentissage en double tâche dans la condition COB5s, indépendamment de la condition par laquelle il commence les expérimentations. Il est demandé au participant de ne prioriser aucune des deux tâches. A la fin des quatre minutes, les produits fabriqués sont démontés puis réinstallés sur le plateau collaboratif, le participant ayant reçu un feedback sur sa tâche auditive.

A la fin des phases d'apprentissage, le participant est équipé de l'oculomètre. Celui-ci est posé sur sa tête, et le boîtier est accroché à une de ses poches sans qu'il ne soit gêné par le fil. La calibration de l'oculomètre s'effectue juste avant chaque essai. Le participant regarde une carte

avec un point au centre pendant environ deux secondes pour calibrer l’outil, à une distance d’environ un mètre. Lorsque la calibration est réussie, le participant est prêt à débiter son essai.

Le participant effectue la totalité des conditions. Il débute soit par les deux conditions de la modalité COB suivies par les deux conditions de la modalité HUM, ou inversement. Pour chaque bloc, soit il commence par les trois essais dans la modalité 2s soit par ceux de la modalité 5s et finissent par ceux de l’autre modalité de la tâche auditive. Par conséquent, il existe quatre schémas de passation possible (Figure 29). Le nombre de participants dans chaque schéma est contrebalancé, soit huit ou neuf participants par schéma.

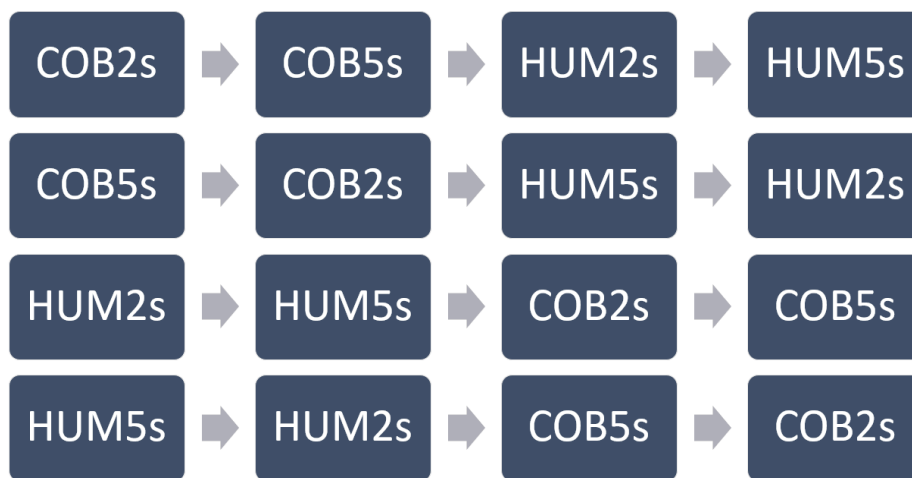


Figure 29 : Schéma des passations possibles

Chaque condition est constituée de trois essais de quatre minutes, coupés par des pauses de deux à trois minutes laissant le temps de démonter les produits pour réinstaller le plan de travail collaboratif et de recalibrer l’oculomètre. Pour chaque essai, les différents outils et les deux tâches doivent être synchronisés. Avant chaque essai, le participant pose sa main droite à plat sur le plateau collaboratif, en collant sa main au socle central (celui-ci se positionne entre le pouce et l’index). Le superviseur déclenche l’enregistrement vidéo de la caméra, puis l’enregistrement de la motion capture et enfin l’enregistrement de l’oculomètre. Lorsque le superviseur l’autorise, le participant retire sa main rapidement vers l’arrière. Ensuite, le participant appuie sur le bouton « play » de la télécommande à la droite du plan de travail pour démarrer le programme du cobot (quand le participant se trouve face à l’humain il simule l’action d’appuyer sur un bouton à sa droite). Au même moment, le superviseur déclenche la tâche auditive. Ainsi, cette étape de calibration permet de synchroniser les deux tâches et les différents outils, puis les outils sont synchronisés à l’aide d’un programme MATLAB.

Au total, le participant est présent dans les locaux environ deux heures et demi pour la réalisation complète de l'expérimentation.

5.1.4 Analyse des données

Les performances aux deux tâches sont manuellement entrées dans le logiciel Microsoft Excel. Pour chaque participant, une valeur moyenne est calculée pour chaque variable à chaque condition (i.e., en moyennant les valeurs des essais de la condition), mais aussi une valeur moyenne pour chaque modalité indépendamment de la condition (i.e., pour COB, pour HUM, pour 2s et pour 5s). Concernant les autres variables, les données sont en amont traitées puis exportées par MATLAB, puis sont triées de la même manière sur Microsoft Excel.

Les données inférieures ou supérieures de trois écart-types à la moyenne sont considérées comme des outliers. Celles-ci sont remplacées par la moyenne des données pour les quatre conditions ou pour les deux modalités (Rustum & Adeloie, 2007).

Les tests statistiques effectués sont des tests non paramétriques pour éviter un mélange entre tests paramétriques et non paramétriques parmi les variables. Pour toutes les variables, des tests sont effectués pour comparer les quatre conditions (i.e., COB2s, COB5s, HUM2s et HUM5s). Les différents tests statistiques sont effectués sur le logiciel STATISTICA v.10.

Pour les performances aux deux tâches, le nombre de produits fabriqués (tâche motrice) et l'erreur absolue (tâche auditive) sont mesurés. Les quatre conditions sont comparées avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman. Lorsque le test est significatif, un test de Wilcoxon pour échantillons appariés est effectué pour observer où se situent les différences significatives. Pour tester les différences entre les deux modalités de la tâche motrice (i.e., COB vs HUM) et celles de la tâche auditive (i.e., 2s vs 5s), des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés sont effectués. Pour le taux de réussite à la tâche auditive, étant une variable qualitative bimodale (réussite ou échec), des tests du χ^2 sont effectués pour comparer les quatre conditions et les différentes modalités des tâches.

Pour toutes les autres variables (i.e., les temps d'actions du co-travailleur et du participant, les temps moyens de leurs actions, les temps d'interaction entre les deux, les scores RULA moyens pour chaque côté, les temps pour chaque score RULA des deux côtés, les scores RULA pour

chaque articulation évaluée, les positions angulaires moyennes des articulations, les scores RULA moyens pour chaque côté pendant les actions du participant, le nombre de fixations et leur durée moyenne, l'amplitude moyenne et la vitesse moyenne des saccades, le coefficient K et le diamètre pupillaire), des comparaisons intra individuelles sont faites entre les différentes conditions avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman suivies d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés si le test précédent est significatif. Les comparaisons entre les modalités des tâches sont effectuées avec un test de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Pour tester un éventuel effet d'apprentissage, pour certaines variables (i.e., le nombre de produits fabriqués ; les taux d'activité directe du participant ; les temps moyens d'une activité directe et d'une inactivité du participant ; les taux de collaboration et de collaboration directe ; les scores RULA moyens pour l'ensemble d'un essai), les valeurs au premier et au dernier essais de la modalité de la tâche motrice (i.e., COB ou HUM) sont comparées avec un test de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Les scores RULA pendant les différentes actions du participant sont comparés entre elles (i.e., « Inactivité » vs « Activité directe » vs « Activité indirecte ») avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman suivie d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés si le test précédent est significatif. De plus, les scores RULA moyens, mais aussi les scores RULA moyens lors de chaque action du participant sont comparés entre les deux bras indépendamment de la condition avec des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Des corrélations sont effectuées pour observer des liens entre les différentes variables. Les corrélations concernent : le nombre de produits fabriqués avec l'erreur absolue à la tâche auditive, avec les scores RULA moyens des deux côtés, avec les temps d'activité et d'activité directe et les temps moyens d'une activité directe du participant, avec les taux de temps mort, collaboration et collaboration directe et avec le nombre de fixations ; le taux d'activité du participant avec le taux de collaboration et avec les scores RULA moyens des deux côtés ; le taux d'activité directe du participant avec le taux de collaboration directe et avec les scores RULA moyens des deux côtés ; le temps moyen d'une activité directe du participant avec les scores RULA moyens des deux côtés. Pour les corrélations significatives, un codage selon la valeur de r est utilisé pour catégoriser la corrélation : lorsque $r \leq 0,35$ la corrélation est faible ;

quand r se situe entre 0,36 et 0,67 la corrélation est modérée ; lorsque r se situe entre 0,68 et 1,00 la corrélation est forte ; quand $r \geq 0.9$ la corrélation est très forte (Taylor, 1990).

Le niveau de significativité α est fixé à 0,05.

5.2 Résultats

5.2.1 Performances aux tâches

Pendant quatre minutes, le participant fabrique des produits en collaboration soit avec un cobot (COB) soit avec un autre humain (HUM). Dans les deux modalités, le participant mène la cadence, qui est libre, avec l'objectif de fabriquer un maximum de produits pendant les quatre minutes. En parallèle, il doit compter le nombre d'occurrence d'une lettre prédéterminée dans une série de lettres d'un enregistrement audio avec un intervalle inter stimuli soit de deux secondes (2s) soit de cinq secondes (5s).

5.2.1.1 La tâche motrice

Le nombre de produits fabriqués diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 82,165$, $p < 0,001$) avec plus de produits fabriqués dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons, Figure 30). Ce nombre est plus important dans la modalité HUM que dans la modalité COB (COB : 5,3 (0,8) ; HUM : 8,0 (1,2) ; $p < 0,001$) tandis qu'aucune différence n'est observée entre les deux modalités de la tâche auditive (2s : 6,9 (1,0) ; 5s : 6,8 (1,1)).

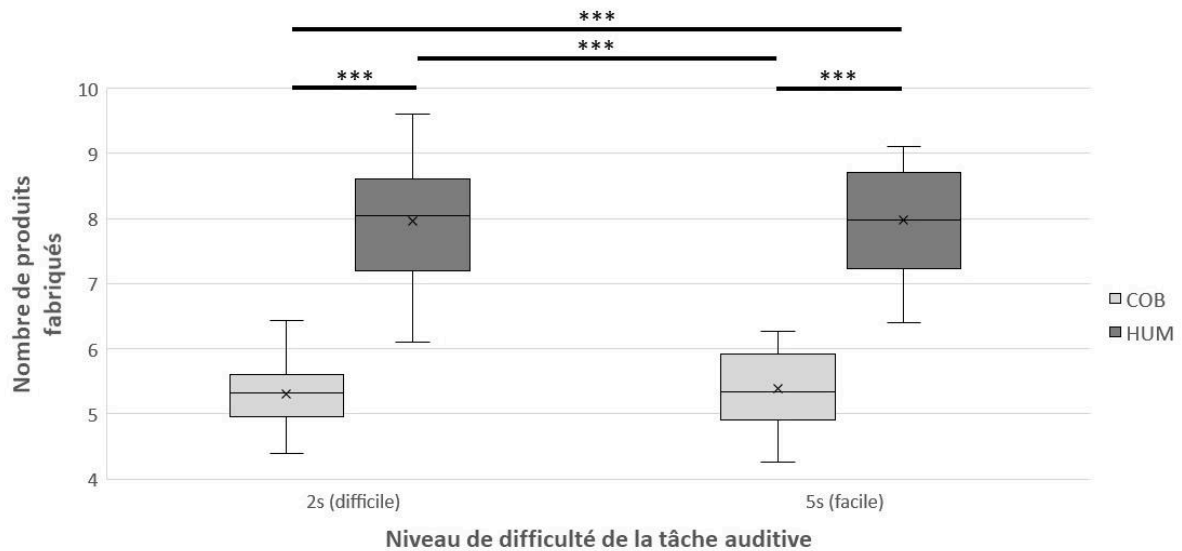


Figure 30 : Nombre de produits fabriqués en quatre minutes. *** $p < 0,001$

Pour les deux modalités de la tâche motrice (i.e., COB et HUM), en comparant le premier essai de celle-ci avec le dernier, indépendamment de la modalité de la tâche auditive, le nombre de produits fabriqués est plus important lors du dernier essai que lors du premier (COB : 5,2 (0,9) et 5,4 (1,0) ; HUM : 7,3 (1,3) et 8,4 (1,2) ; $p < 0,001$ pour les deux comparaisons).

5.2.1.2 La tâche auditive

Le taux de réussite est dépendant de la condition ($\chi^2(3) = 29,8$, $p < 0,001$) avec un taux plus important pour les conditions COB5s et HUM5s comparativement aux conditions COB2s et HUM2s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). De plus, ce taux est plus important dans la modalité 5s que dans la modalité 2s ($p < 0,001$) tandis qu'aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche motrice. Les taux de réussite sont décrits dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Performances à la tâche auditive. Les résultats de l'erreur absolue sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre les modalités 2s et 5s.

	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Taux de réussite (en %)	12,4 ‡	31,0 §	6,9 ‡	31,4 §	21,8	19,1	9,5	31,2 *
Erreur absolue	4,0 ‡ (2,5)	1,2 § (1,0)	2,8 # (2,0)	1,2 § (1,0)	2,2 (1,7)	2,3 (1,6)	3,3 (2,6)	1,2 * (0,9)

Concernant l'erreur absolue (Tableau 3), celle-ci diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 51,924$, $p < 0,001$) avec une erreur plus importante pour la condition COB2s ($p < 0,05$ avec HUM2s et $p < 0,001$ avec COB5s et HUM5s) suivie par HUM2s ($p < 0,001$ avec les deux autres comparaisons), puis enfin par les conditions COB5s et HUM5s. L'erreur absolue est plus importante dans la modalité 2s que dans la modalité 5s ($p < 0,001$). Aucune différence n'est observée entre les deux modalités de la tâche motrice.

5.2.2 La fluidité des interactions entre le participant et le co-travailleur

5.2.2.1 Les actions du co-travailleur

La somme des taux d'inactivité et d'activité du co-travailleur est égale à 1, ainsi seules les valeurs de l'inactivité sont présentées.

Les taux d'inactivité (Tableau 4) et d'activité du co-travailleur diffèrent selon la condition ($\chi^2(3) = 62,082$, $p < 0,001$) avec une inactivité moins importante (donc une activité plus importante) dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Le taux d'inactivité est plus important dans la modalité HUM que dans la modalité COB ($p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités 2s et 5s.

Tableau 4 : Actions du co-travailleur. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM.

	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Taux d'inactivité (en %)	62,8 ‡ (11,2)	63,5 ‡ (9,6)	69,4 § (4,7)	69,1 § (5,1)	62,9 (8,5)	69,3 * (5,0)	65,7 (8,9)	66,5 (5,6)
Temps moyen d'une activité (en s)	3,8 ‡ (1,3)	3,8 ‡ (1,3)	2,2 § (0,5)	2,2 § (0,6)	3,8 (1,3)	2,2 * (0,5)	3,4 (1,0)	3,2 (1,1)

Le temps moyen d'une activité du co-travailleur (Tableau 4) dépend de la condition ($\chi^2(3) = 81,953$, $p < 0,001$). Ce temps est plus important dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). De plus, ce temps est plus important dans la modalité HUM que dans la modalité COB ($p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités 2s et 5s.

5.2.2.2 Les actions du participant

La somme des taux d'inactivité et d'activité du participant est égale à 1, ainsi seules les valeurs de l'inactivité sont présentées.

Les taux d'inactivité (Figure 31) et d'activité du participant diffèrent selon la condition ($\chi^2(3) = 82,482$, $p < 0,001$) avec un taux d'inactivité plus important (donc un taux d'activité moins important) dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Le taux d'inactivité est plus important dans la modalité COB que dans la modalité HUM (COB : 29,6 (8,3) ; HUM : 8,0 (2,8) ; $p < 0,001$) et dans la modalité 2s que dans la modalité 5s (COB : 23,2 (5,1) ; HUM : 20,0 (5,7) ; $p < 0,01$). En comparant le premier essai avec le dernier pour les deux modalités de la tâche motrice indépendamment de celles de la tâche auditive, le taux d'inactivité est plus important dans le dernier essai que dans le premier pour la modalité COB (29,5 (8,0) et 31,0 (9,7) ; $p < 0,05$) tandis qu'aucune différence n'est observée pour la modalité HUM (7,9 (3,6) et 8,1 (3,5) ; $p = 0,285$).

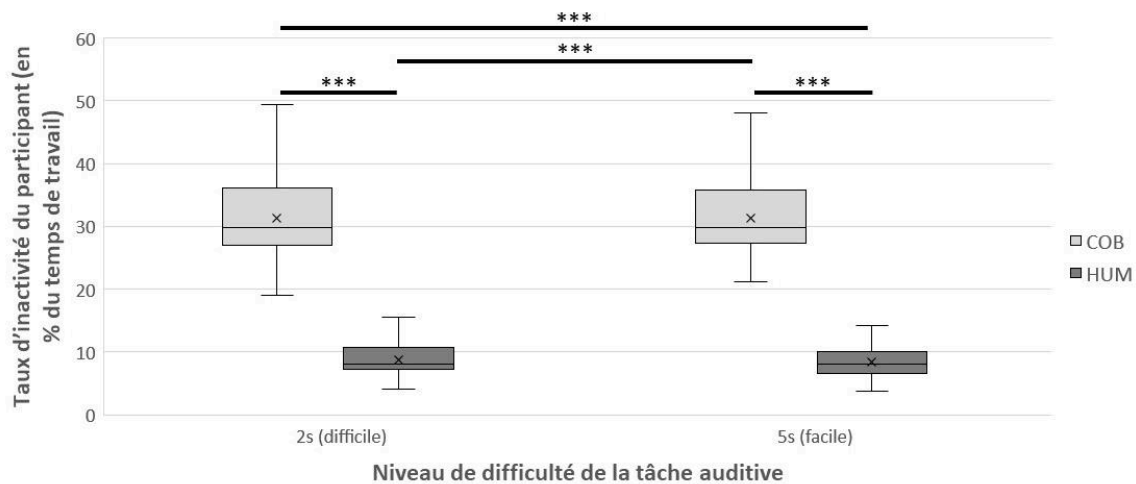


Figure 31 : Taux d'inactivité du participant en quatre minutes. *** $p < 0,001$

Concernant les différentes activités du participant, le taux de l'activité directe ainsi que celui de l'activité indirecte diffèrent selon la condition ($p < 0,001$ pour les deux activités) avec des taux plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons des deux variables). Ces taux sont plus importants dans la modalité HUM que dans la modalité COB ($p < 0,001$ pour les deux variables) tandis qu'aucune différence n'a été observée entre les modalités 2s et 5s. Les taux d'activités directe et indirecte sont décrits dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Actions du participant. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM ou entre les modalités 2s et 5s.

	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Taux d'activité directe (en %)	38,0 [‡] (7,1)	38,7 [‡] (5,4)	56,2 [§] (7,7)	57,3 [§] (4,9)	38,1 (6,0)	56,8 [*] (5,9)	45,0 (6,2)	46,5 (4,7)
Taux d'activité indirecte (en %)	29,1 [‡] (5,6)	28,5 [‡] (6,0)	34,4 [§] (9,4)	33,9 [§] (9,9)	29,3 (5,9)	33,9 [*] (9,6)	29,9 (6,6)	32,6 (5,3)
Temps moyen d'une inactivité (en s)	3,3 [‡] (0,9)	3,2 [§] (1,1)	1,9 [#] (0,6)	1,9 [#] (0,5)	3,1 (1,0)	1,9 [*] (0,5)	2,8 (0,7)	2,8 (0,8)
Temps moyen d'une activité directe (en s)	4,1 (0,8)	4,1 (0,8)	4,1 (1,1)	4,2 (1,0)	4,1 (0,7)	4,0 (0,9)	4,1 (0,8)	4,1 [*] (0,8)

En comparant le premier essai avec le dernier pour les deux modalités de la tâche motrice indépendamment de celles de la tâche auditive, aucune différence n'a été observée pour le taux d'activité directe entre le dernier essai et le premier dans les modalités COB (38,2 (8,3) et 37,4 (7,2) et HUM (57,0 (6,4) et 56,8 (6,7)) ; il en est de même pour l'activité indirecte dans les deux modalités de la tâche motrice (COB : 29,1 (6,7) et 28,1 (7,5) ; HUM : 34,8 (6,9) et 32,7 (7,8)).

Le temps moyen d'une inactivité du participant (Tableau 5) diffère selon la condition ($\chi^2 (3) = 60,388$, $p < 0,001$) avec des temps plus importants pour la condition COB2s ($p < 0,05$ avec COB5s et $p < 0,001$ avec HUM2s et HUM5s) suivie par COB5s ($p < 0,001$ avec les deux autres comparaisons), puis enfin par les conditions HUM2s et HUM5s. Ce temps moyen est plus important dans la modalité COB que dans la modalité HUM ($p < 0,001$) tandis qu'aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive. Le temps moyen d'une activité directe du participant (Tableau 5) ne diffère pas selon la condition ni selon la modalité de la tâche motrice. Cependant, ce temps moyen est plus important dans la modalité 5s que dans la modalité 2s ($p < 0,05$).

Toutefois, le temps moyen d'une activité directe du participant est plus important lors du premier essai comparativement au dernier dans les modalités COB et HUM (COB : 4,3 (1,1) et 4,0 (0,8) ; HUM : 4,4 (0,9) et 3,9 (1,0) ; $p < 0,001$ pour les deux comparaisons). Le temps moyen d'une inactivité ne diffère pas entre le premier essai et le dernier pour les deux modalités (COB : 2,4 (1,2) et 2,8 (1,6) ; HUM : 2,3 (1,5) et 2,6 (1,2)).

5.2.2.3 Les interactions entre les deux travailleurs

Le taux de temps mort (Figure 32) diffère selon la condition ($\chi^2 (3) = 72,565$, $p < 0,001$). Ce taux est plus important dans les conditions COB2s et COB5s comparativement aux conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Le taux de temps mort est plus important dans la modalité COB que dans la modalité HUM (COB : 9,3 (5,3) ; HUM : 1,0 (1,0) ; $p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive.

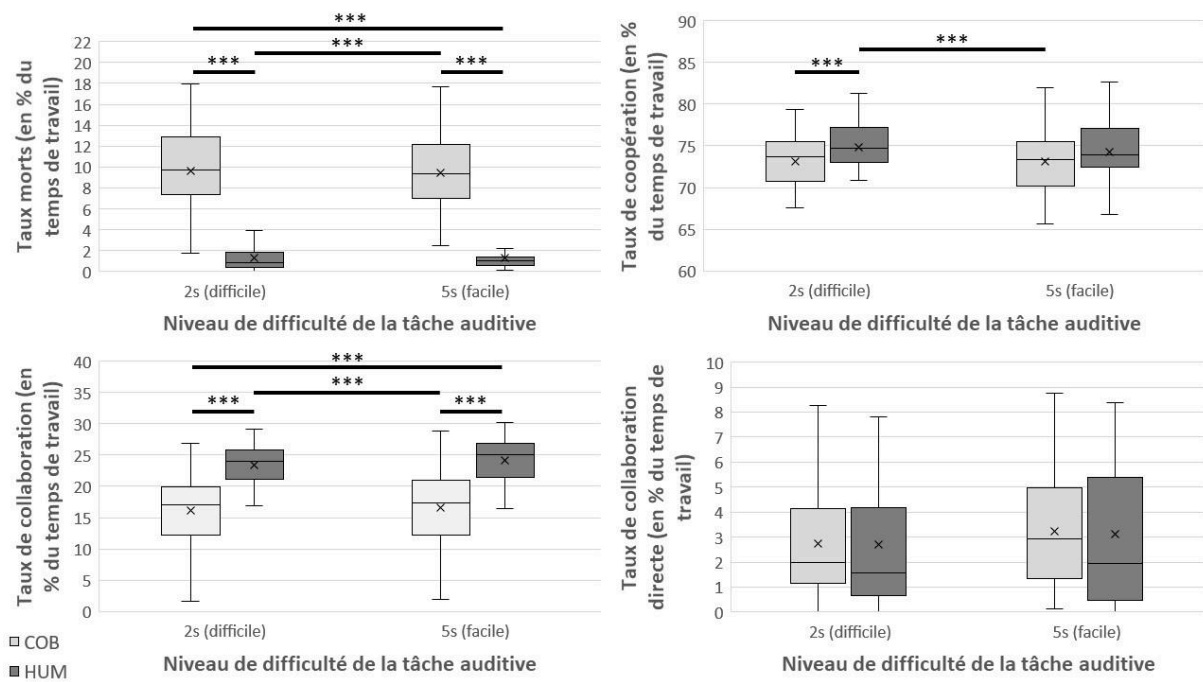


Figure 32 : Taux d'interactions entre le participant et le co-travailleur en quatre minutes. *** $p < 0,001$

Le taux de coopération (Figure 32) diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 11,541$, $p < 0,01$) avec un taux plus important dans la condition HUM2s que dans les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,01$ pour les deux comparaisons). Aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche motrice (COB : 73,3 (4,2) ; HUM : 74,1 (3,4)) ni entre celles de la tâche auditive.

Le taux de collaboration (Figure 32) diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 56,047$, $p < 0,001$). Ce taux est plus important dans les conditions HUM2s et HUM5s comparativement aux conditions COB2s et COB5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Ce taux est plus important dans la modalité HUM que dans la modalité COB (COB : 17,2 (7,5) ; HUM : 24,4 (4,7) ; $p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive. Concernant le taux de collaboration directe (Figure 32), celui-ci ne diffère pas selon la condition. Aucune différence n'est observée entre les modalités COB et HUM (COB : 2,6 (3,1) ; HUM : 1,6 (4,6)) tandis que le taux est plus important dans la modalité 5s que dans la modalité 2s ($p < 0,05$).

En comparant le premier essai avec le dernier pour les deux modalités de la tâche motrice indépendamment de celles de la tâche auditive, le taux de collaboration n'est pas différent pour les deux modalités (COB : 17,2 (7,8) et 17,4 (8,2) ; HUM : 23,3 (4,5) et 25,8 (4,5)) tandis que le taux de collaboration directe est plus important dans le dernier essai que dans le premier pour les modalités COB (1,5 (2,3) et 3,3 (3,9) ; $p < 0,01$) et HUM (1,5 (3,2) et 2,2 (5,3) ; $p < 0,001$).

5.2.3 La posture du participant

A partir des données cinématiques de la motion capture, une évaluation RULA est effectuée en continu pendant un essai. Ce score est compris entre 1 et 7. Plus il est important, plus la posture est à risque de développer des TMS. Ces scores RULA sont moyennés pour l'ensemble d'un essai, mais aussi pendant les différentes actions du participant (i.e., « Inactivité », « Activité directe » et « Activité indirecte »).

Lors des étapes de l'évaluation RULA, des scores RULA sont données pour chaque articulation. Mais aussi, à partir des données cinématiques de la motion capture, les angles moyens des articulations des membres supérieurs, du tronc et de la nuque sont calculés pour l'ensemble d'un essai, mais aussi pendant les différentes actions du participant.

5.2.3.1 Pendant l'ensemble d'un essai

5.2.3.1.1 Les scores RULA moyens du participant

Pour le côté gauche et pour le côté droit, ce score diffère selon la condition ($p < 0,001$ pour les deux côtés) avec des scores plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s (côté droit : $p < 0,05$ entre COB2s et HUM5s, $p < 0,01$ entre COB2s et HUM2s et entre COB5s et HUM5s, $p < 0,001$ entre COB5s et HUM2s ; côté gauche : $p < 0,001$ pour les quatre comparaisons, Figure 33). Les scores RULA pour les deux côtés sont supérieurs dans la modalité HUM par rapport à la modalité COB (gauche COB = 3,62 (0,58) ; gauche HUM = 3,95 (0,41) ; droit COB = 3,40 (0,42) ; droit HUM = 3,61 (0,43) ; $p < 0,001$ pour les deux côtés). Une différence est observée entre les deux modalités de la tâche auditive uniquement pour le côté droit avec un score plus important dans la modalité 2s (gauche 2s = 3,86 (0,40) ; gauche 5s = 3,79 (0,53) ; droit 2s = 3,55 (0,36) ; droit 5s = 3,50 (0,46) ; $p < 0,05$).

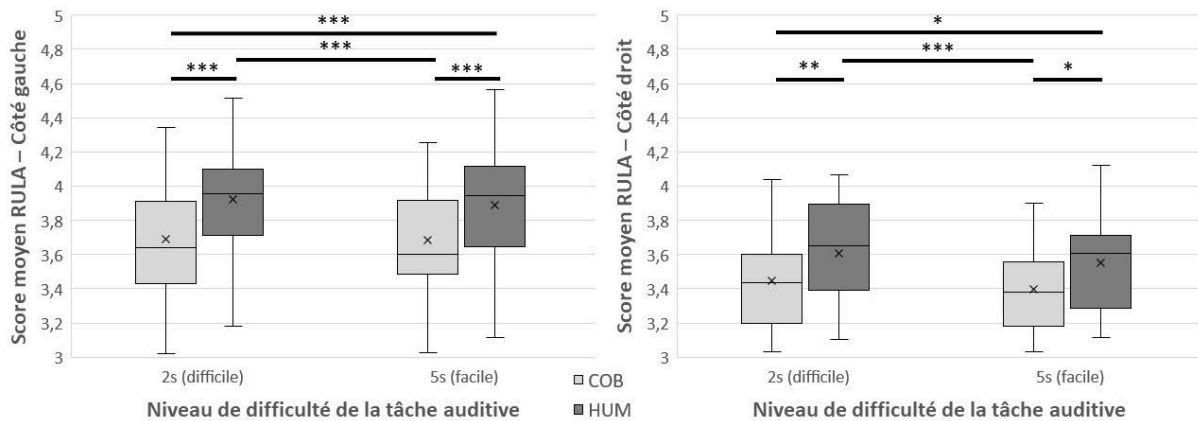


Figure 33 : Scores RULA pour le côté gauche et pour le côté droit. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

En comparant le score RULA du premier essai avec celui du dernier pour les deux modalités de la tâche motrice indépendamment de celles de la tâche auditive, pour les deux côtés, aucune différence n'est observée (gauche COB : 3,65 (0,44) et 3,66 (0,66) ; gauche HUM : 4,06 (0,53) et 3,91 (0,40) ; droit COB : 3,43 (0,38) et 3,37 (0,47) ; droit HUM : 3,70 (0,64) et 3,58 (0,60)).

5.2.3.1.2 Les temps pour les scores RULA

Puisque la somme des scores r1, r2 et r7 est en moyenne inférieure à 2% et que la majorité des temps pour ces scores est égale à 0%, seuls les temps des scores r3, r4, r5 et r6 sont décrits.

Pour le côté gauche et pour le côté droit, les temps dans le score r3 diffèrent selon la condition ($p < 0,001$ pour les deux côtés) avec des temps plus importants dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s (côté gauche : $p < 0,001$ pour toutes les comparaisons des deux scores ; côté droit : $p < 0,05$ entre COB2s et HUM5s pour r3, $p < 0,01$ entre COB5s et HUM5s pour r3, $p < 0,001$ pour les autres comparaisons). Les temps pour le score r3 sont plus importants dans la modalité COB que dans la modalité HUM pour les deux côtés ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). En revanche, aucune différence n'est observée entre les modalités 2s et 5s pour le score r3 pour les deux côtés. Les temps pour le score r3 sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Temps passé pour les scores RULA pour les deux côtés (en %). r3, r4, r5 et r6 correspondent respectivement aux scores 3, 4, 5 et 6 lors de l'évaluation RULA. G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM.

		COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
r3	G	52,9 [‡] (28,0)	50,4 [‡] (25,3)	28,8 [§] (22,0)	34,5 [§] (20,8)	54,4 (21,6)	32,9 * (21,3)	41,7 (21,1)	42,0 (24,3)
	D	59,8 [‡] (23,4)	63,0 [‡] (27,7)	48,0 [§] (41,0)	54,9 [§] (34,5)	59,2 (21,9)	51,1 * (34,6)	53,3 (23,2)	57,9 (31,3)
r4	G	30,1 [‡] (12,1)	31,9 [‡] (20,0)	44,3 [§] (19,4)	37,4 [§] (22,0)	30,4 (15,2)	39,9 * (16,5)	37,2 (14,3)	37,0 (17,6)
	D	29,0 [‡] (17,1)	28,1 [‡] (21,7)	34,6 [§] (31,8)	32,1 [§] (25,6)	29,9 (16,4)	35,5 * (24,8)	34,6 (18,6)	29,0 (19,5)
r5	G	11,5 [‡] (12,6)	11,9 [‡] (11,0)	16,0 [§] (15,0)	16,1 [§] (14,5)	13,1 (10,6)	16,3 * (13,7)	14,5 (12,3)	13,0 (13,0)
	D	2,8 [‡] (5,3)	3,1 [‡] (4,5)	6,8 [§] (9,0)	5,6 [§] (8,9)	3,0 (4,5)	6,2 * (5,5)	5,1 (6,5)	4,4 (7,5)
r6	G	1,3 (4,9)	1,3 (3,4)	3,8 (5,3)	2,8 (7,6)	1,4 (3,7)	3,5 (5,9)	3,2 (4,9)	2,8 (4,6)
	D	0,8 (2,3)	0,5 (1,2)	0,8 (2,9)	0,5 (2,3)	0,7 (1,1)	0,6 (2,9)	1,0 (2,2)	0,6 (2,2)

Les temps dans les scores r4 et r5, pour le côté gauche et pour le côté droit, diffèrent selon la condition ($p < 0,001$ pour les deux côtés et les deux scores). Les temps dans les scores r4 et r5 sont plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s (côté gauche : $p < 0,001$ pour toutes les comparaisons des deux scores ; côté droit : $p < 0,01$ entre COB2s et HUM5s et entre COB5s et HUM2s pour r4 et pour toutes les comparaisons pour r5, $p < 0,001$ entre COB2s et HUM2s et entre COB5s et HUM5s pour r4). Les temps pour les scores r4 et r5 sont plus importants dans la modalité HUM que la modalité COB pour les deux côtés (gauche : $p < 0,001$ pour r4 et r5 ; droit : $p < 0,01$ pour r5 et $p < 0,001$ pour r4). Aucune différence n'est observée entre les modalités 2s et 5s pour les scores r4 et r5 pour les deux côtés. Les temps des scores r4 et r5 sont présentés dans le Tableau 6.

Aucune différence n'est observée pour les temps dans le score r6 pour les deux côtés ni entre les différentes conditions, ni entre les modalités de TM ni entre les modalités de TA. Les temps pour le score r6 sont présentés dans le Tableau 6.

5.2.3.1.3 Les contraintes pour chaque articulation : scores RULA

D'une part, lors de l'évaluation RULA, une des tables indique un score à partir des articulations de la nuque et du dos. Cette table est identique pour l'évaluation RULA des deux côtés. Les scores RULA pour chaque articulation sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Scores RULA pour les articulations mesurées dans l'évaluation RULA. G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM ou entre les modalités 2s et 5s.

		COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Nuque		2,0 (0,5)	2,1 (0,4)	2,1 (0,5)	2,1 (0,6)	2,0 (0,4)	2,1 (0,5)	2,1 (0,4)	2,1 (0,4)
Dos		2,3 ‡ (0,6)	2,2 ‡ (0,5)	2,5 § (0,7)	2,4 § (0,5)	2,3 (0,6)	2,5 * (0,6)	2,4 (0,6)	2,4 (0,5)
Épaules	G	2,4 ‡ (0,2)	2,5 ‡ (0,2)	2,6 § (0,3)	2,6 § (0,2)	2,4 (0,2)	2,6 * (0,3)	2,5 (0,3)	2,5 (0,3)
	D	2,3 ‡ (0,1)	2,3 ‡ (0,2)	2,4 § (0,3)	2,4 § (0,3)	2,3 (0,2)	2,4 * (0,3)	2,3 (0,3)	2,3 (0,2)
Coudes	G	2,5 ‡ (0,3)	2,6 ‡ (0,3)	2,8 § (0,2)	2,7 § (0,3)	2,6 (0,3)	2,7 * (0,2)	2,6 (0,3)	2,6 * (0,3)
	D	1,8 ‡ (0,2)	1,8 ‡ (0,2)	1,9 § (0,3)	1,9 § (0,3)	1,8 (0,2)	1,9 * (0,2)	1,8 (0,2)	1,8 (0,2)
Poignets	G	2,6 (0,2)	2,6 (0,2)	2,6 (0,2)	2,6 (0,3)	2,6 (0,2)	2,6 (0,2)	2,6 (0,2)	2,5 (0,2)
	D	2,6 (0,3)	2,6 (0,3)	2,6 (0,4)	2,5 (0,4)	2,6 (0,3)	2,5 (0,4)	2,6 (0,4)	2,5 (0,3)

Le score pour la nuque est similaire entre les quatre conditions et entre les différentes modalités des deux tâches. Cependant, le score pour le dos diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 33,000$, $p < 0,001$). Les scores sont plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Le score RULA pour le dos est plus important dans la modalité HUM que dans la modalité COB ($p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée pour les modalités de la tâche auditive.

Pour le poignet droit, les scores ne diffèrent ni selon la condition ni selon la modalité des deux tâches. Cependant, les scores diffèrent selon la condition pour l'épaule et le coude droits ($p < 0,001$ pour les deux articulations) avec des scores plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s (épaule : $p < 0,05$ entre COB5s et HUM5s, $p < 0,01$ pour COB2s avec HUM2s et HUM5s et pour COB5s et HUM2s ; coude : $p < 0,05$

pour COB5s avec HUM2s et HUM5s et pour COB2s et HUM2s, $p < 0,01$ entre COB2s et HUM5s). Les scores sont similaires entre les modalités de la tâche auditive pour les deux articulations tandis que les scores sont plus importants dans la modalité HUM que dans la modalité COB pour les deux articulations ($p < 0,01$ pour les deux comparaisons).

Pour le poignet gauche, les scores ne diffèrent ni selon la condition ni selon la modalité des deux tâches. Cependant, les scores diffèrent selon la condition pour l'épaule et le coude gauches ($p < 0,001$ pour les deux articulations) avec des scores plus importants dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s (épaule : $p < 0,01$ entre COB5s et HUM2s, $p < 0,001$ pour COB2s avec HUM2s et HUM5s et pour COB5s et HUM5s ; coude : $p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Les scores sont plus importants dans la modalité HUM que dans la modalité COB pour les deux articulations ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons) tandis que les scores à la modalité 2s sont plus importants que ceux à la modalité 5s uniquement pour le coude gauche ($p < 0,05$).

5.2.3.1.4 Les contraintes pour chaque articulation : position angulaire

Les positions moyennes des articulations des membres supérieurs, du dos et de la nuque sont calculées pour l'ensemble d'un essai. Ainsi, les abductions des deux épaules et les flexions des épaules, des coudes, des poignets, du dos et de la nuque sont mesurées. Pour rappel, les postures optimales définies par NIOSH sont : 0° de flexion/extension et d'abduction/adduction d'épaule, 90° de flexion de coude, 0° de flexion de poignet, de nuque et de dos (Moore et al., 2011). Les positions moyennes des articulations sont présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Position angulaire des articulations des membres supérieurs, de la nuque et du dos (en °). G pour le côté gauche. D pour le côté droit. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les quatre conditions sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les quatre conditions signifie aucune différence significative entre les quatre conditions. * représente une différence significative entre les modalités COB et HUM.

		COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Épaules (abd°)	G	14,4 ‡ (3,5)	14,6 ‡ (3,8)	14,3 § (4,6)	13,7 § (4,8)	14,5 * (3,5)	14,0 (4,6)	14,2 (4,1)	14,0 (4,0)
	D	19,9 ‡ (7,1)	19,3 ‡ (5,7)	17,0 § (7,4)	16,5 § (6,5)	19,1 (7,1)	17,0 (6,0)	18,8 (6,7)	18,5 (8,5)
Épaules (flex°)	G	14,6 ‡ (11,5)	15,1 ‡ (8,8)	19,8 § (12,3)	19,3 § (9,4)	14,7 (10,1)	20,1 * (9,1)	18,1 (9,3)	17,2 (10,2)
	D	10,0 ‡ (10,2)	9,8 ‡ (12,4)	15,7 § (11,4)	14,0 § (11,0)	10,1 (10,3)	13,9 * (11,3)	13,1 (9,2)	11,5 (8,8)
Coudes	G	58,5 ‡ (15,9)	62,7 ‡ (14,7)	52,1 § (12,1)	51,9 § (16,3)	60,8 * (14,9)	52,0 (14,1)	55,6 (15,1)	56,6 (14,4)
	D	62,8 ‡ (16,7)	62,2 ‡ (20,0)	56,9 § (13,0)	56,8 § (14,1)	62,5 * (18,8)	55,8 (13,7)	60,7 (16,3)	59,1 (17,7)
Poignets	G	-24,7 (6,9)	-25,3 (6,5)	-23,2 (7,8)	-23,7 (5,7)	-25,0 (6,7)	-23,4 (7,6)	-23,8 (6,4)	-24,0 (6,0)
	D	-22,3 (12,4)	-22,3 (13,0)	-22,5 (11,8)	-21,2 (12,6)	-22,5 (11,7)	-21,9 (11,7)	-22,4 (12,8)	-21,4 (12,6)
Nuque		11,4 (6,3)	12,0 (5,8)	11,5 (4,4)	12,7 (6,0)	11,5 (5,9)	12,1 (6,0)	11,4 (6,1)	12,3 (6,0)
Dos		1,9 ‡ (7,1)	2,6 ‡ (6,6)	4,4 § (9,9)	5,3 § (9,7)	2,5 (6,8)	4,6 * (8,5)	3,7 (6,7)	5,0 (7,4)

Les abductions des deux épaules diffèrent selon la condition (épaule droite : $\chi^2(3) = 13,306$, $p < 0,01$; épaule gauche : $\chi^2(3) = 14,224$, $p < 0,01$). Les abductions moyennes sont plus importantes dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,01$ entre COB5s et HUM2s pour les deux épaules et entre COB5s et HUM5s pour l'épaule gauche ; $p < 0,05$ pour les autres comparaisons. Les valeurs entre les deux modalités de la tâche motrice semblent plus importantes pour COB que pour HUM pour l'épaule gauche ($p < 0,05$) mais pas pour l'épaule droite. Aucune différence n'a été observée entre les deux modalités de la tâche auditive (i.e., 2s et 5s) pour les deux épaules.

Les flexions des deux épaules diffèrent selon la condition (épaule droite : $\chi^2(3) = 22,553$, $p < 0,001$; épaule gauche : $\chi^2(3) = 40,729$, $p < 0,001$). Les flexions moyennes sont plus importantes dans les conditions HUM2s et HUM5s que dans les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Les valeurs entre les deux modalités de la tâche motrice sont plus importantes pour COB que pour HUM ($p < 0,001$ pour les deux épaules). Aucune différence n'a été observée entre les deux modalités de la tâche auditive pour les deux épaules.

Les flexions des deux coudes diffèrent selon la condition (coude droit : $\chi^2 (3) = 29,752$, $p < 0,001$; coude gauche : $\chi^2 (3) = 55,588$, $p < 0,001$). Les flexions moyennes sont plus importantes dans les conditions COB2s et COB5s que dans les conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Les valeurs entre les deux modalités de la tâche motrice sont plus importantes pour COB que pour HUM ($p < 0,001$ pour les deux coudes). Aucune différence n'a été observée entre les deux modalités de la tâche auditive pour les deux coudes.

Les flexions des deux poignets ne diffèrent pas selon la condition (poignet droit : $\chi^2 (3) = 1,447$, $p = 0,695$; poignet gauche : $\chi^2 (3) = 3,494$, $p = 0,322$). Concernant les valeurs entre les deux modalités de la tâche motrice, aucune différence n'a été observée entre COB et HUM pour les deux côtés. Aucune différence n'a été observée entre les deux modalités de la tâche auditive pour les deux poignets.

La flexion du dos diffère selon la condition ($\chi^2 (3) = 20,012$, $p < 0,001$). La flexion moyenne est plus importante que dans les conditions COB2s et COB5s par rapport aux conditions HUM2s et HUM5s ($p < 0,05$ pour HUM2s avec COB2s et COB5s ; $p < 0,01$ pour HUM5s avec COB2s et COB5s). Les valeurs entre les deux modalités de la tâche motrice sont plus importantes pour COB que pour HUM ($p < 0,01$). Aucune différence n'a été observée entre les deux modalités de la tâche auditive. La flexion de la nuque ne diffère pas selon la condition ($\chi^2 (3) = 0,988$, $p = 0,804$). Aucune différence n'a été observée entre les modalités de la tâche motrice et entre les modalités de la tâche auditive.

5.2.3.2 Pendant les actions du participant

5.2.3.2.1 Les scores RULA pendant les actions du participant

Un score RULA moyen est calculé pour chaque action du participant (i.e., « Inactivité », « Activité directe » et « Activité indirecte ») pour les deux côtés. Les scores RULA des deux côtés pendant les différentes actions du participant sont décrits dans la Figure 34.

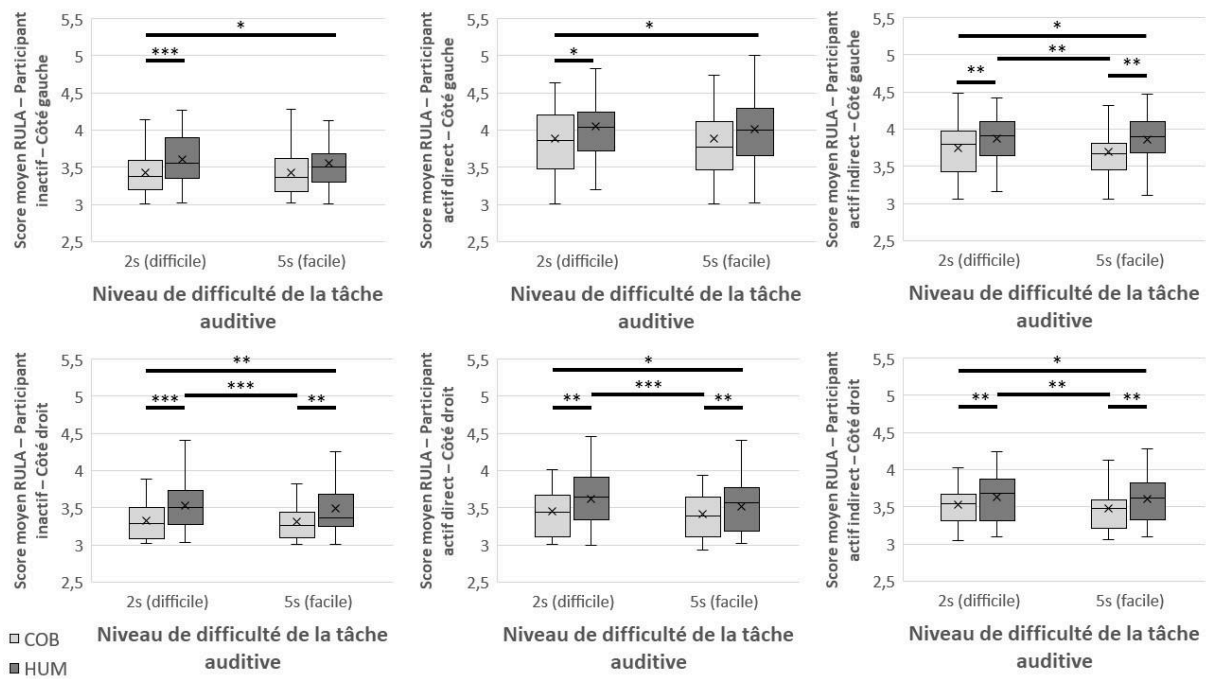


Figure 34 : Scores RULA moyens des deux côtés pendant les activités du participant. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

Lorsque le participant est inactif, le score RULA diffère selon la condition ($p < 0,001$ pour le côté droit et $p < 0,01$ pour le côté gauche). Ce score est plus important pour les conditions HUM2s et HUM5s que pour les conditions COB2s et COB5s pour le côté droit ($p < 0,01$ pour HUM5s avec COB2s et COB5s, $p < 0,001$ pour HUM2s avec COB2s et COB5s), et pour la condition HUM2s comparativement aux conditions COB2s ($p < 0,001$) et COB5s ($p < 0,05$), pour le côté gauche. Les scores RULA pendant les temps d'inactivité du participant sont plus importants dans la modalité HUM que COB ($p < 0,001$ pour le côté droit et $p < 0,05$ pour le côté gauche) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive.

Lorsque le participant est en activité directe, le score RULA diffère selon la condition ($p < 0,001$ pour le côté droit et $p < 0,01$ pour le côté gauche). Ce score est plus important pour les conditions HUM2s et HUM5s que pour les conditions COB2s et COB5s pour le côté droit ($p < 0,05$ entre HUM5s et COB2s, $p < 0,01$ pour HUM2s avec COB2s et COB5s et pour HUM5s avec COB5s), et pour la condition HUM2s comparativement aux conditions COB2s ($p < 0,05$) et COB5s ($p < 0,05$), pour le côté gauche. Les scores RULA pendant les périodes d'activité directe du participant sont plus importants dans la modalité HUM que COB ($p < 0,001$ pour le côté droit et $p < 0,05$ pour le côté gauche) et seule une différence est observée entre les modalités de la tâche auditive pour le côté droit ($p < 0,05$) avec un score plus élevé pour la modalité 2s.

Lorsque le participant est en activité indirecte, le score RULA diffère selon la condition ($p < 0,001$ pour les deux côtés). Ce score est plus important pour les conditions HUM2s et HUM5s que pour les conditions COB2s et COB5s ($p < 0,05$ entre HUM5s et COB2s, $p < 0,01$ pour HUM2s avec COB2s et COB5s et pour HUM5s avec COB5s pour les deux côtés). Les scores RULA pendant les périodes d'activité indirecte du participant sont plus importants dans la modalité HUM que COB ($p < 0,001$ pour le côté droit et $p < 0,01$ pour le côté gauche) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive.

5.2.3.2.2 Comparaison des scores RULA lors des actions du participant

Pour le côté droit, quelle que soit la condition, le score RULA est le plus important lors des activités indirectes ($p < 0,001$ avec les deux autres actions) suivi des activités directes ($p < 0,05$ avec les inactivités). Pour le côté gauche, quelle que soit la condition, le score RULA est le plus important lors des activités directes ($p < 0,001$ avec les deux autres actions) suivi des activités indirectes ($p < 0,001$ avec les inactivités).

Dans la modalité COB, les scores sont plus importants lors des activités indirectes que lors des inactivités ($p < 0,001$) et des activités directes ($p < 0,05$) pour le côté droit. En revanche, les scores sont maximaux lors des activités indirectes et directes par rapport aux inactivités ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons) pour le côté gauche. Dans la modalité HUM, les scores sont plus importants lors des activités indirectes et directes que lors des inactivités ($p < 0,01$) pour le côté droit, tandis que les scores sont maximaux lors des activités directes et indirectes par rapport aux inactivités ($p < 0,001$ pour les scores des activités directes et $p < 0,01$ avec les scores des activités indirectes). Les scores RULA pour les deux côtés lors des actions du participant (i.e., inactivité, activité directe et activité indirecte) sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Comparaison entre les scores RULA des deux côtés lors des actions du participant pour l'ensemble des conditions et les modalités de la TM. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois variables sur une colonne, des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre le côté gauche et le côté droit.

	Toutes conditions		COB		HUM	
	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
Inactivité	3,45 ‡, * (0,39)	3,36 ‡ (0,38)	3,37 ‡, * (0,44)	3,26 ‡ (0,35)	3,55 ‡, * (0,35)	3,48 ‡ (0,37)
Activité Directe	3,96 §, * (0,60)	3,49 § (0,54)	3,85 §, * (0,65)	3,42 § (0,51)	3,99 §, * (0,53)	3,58 § (0,53)
Activité Indirecte	3,80 #, * (0,45)	3,55 # (0,46)	3,74 #, * (0,53)	3,50 # (0,36)	3,92 #, * (0,51)	3,64 # (0,39)

5.2.3.3 Comparaison entre les deux côtés

Pour les scores RULA, les deux côtés sont comparés sur l'ensemble de l'essai, mais aussi lors des différentes actions du participant.

Pendant tout l'essai, le score du côté gauche est plus important que celui du côté droit quelle que soit la condition (Figure 33, $p < 0,001$ pour les quatre comparaisons). Les scores du côté gauche sont également plus importants que pour le côté droit, concernant toutes les actions du participant quelle que soit la condition (Tableau 10, $p < 0,001$ pour toutes les comparaisons) et la modalité de la tâche motrice (Tableau 9, $p < 0,001$ pour toutes les comparaisons).

Tableau 10 : Scores RULA pour les deux côtés lors des actions du participant selon la condition. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). * représente une différence significative entre le côté gauche et le côté droit.

	COB2s		COB5s		HUM2s		HUM5s	
	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
Inactivité	3,38 * (0,37)	3,29 (0,40)	3,36 * (0,40)	3,26 (0,34)	3,55 * (0,47)	3,50 (0,39)	3,51 * (0,37)	3,37 (0,40)
Activité Directe	3,86 * (0,69)	3,45 (0,54)	3,77 * (0,69)	3,39 (0,53)	4,03 * (0,46)	3,64 (0,55)	4,00 * (0,58)	3,57 (0,54)
Activité Indirecte	3,80 * (0,52)	3,55 (0,32)	3,66 * (0,31)	3,48 (0,35)	3,92 * (0,44)	3,68 (0,51)	3,89 * (0,39)	3,62 (0,45)

5.2.4 Le comportement oculomoteur

5.2.4.1 Les fixations

Le nombre de fixations au cours d'un essai diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 22,376, p < 0,001$) avec un nombre plus important pour les conditions COB2s et COB5s que pour les conditions HUM2s et HUM5s (Figure 35). Une tendance à la significativité est observée entre les conditions HUM2s et HUM5s ($p = 0,05$) avec plus de fixations dans la condition HUM5s. Le nombre de fixations est plus important dans la modalité COB que dans la modalité HUM (COB = 263,7 (86,5) ; HUM = 213,4 (50,0) ; $p < 0,01$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive (2s = 235,2 (59,5) ; 5s = 235,9 (36,5)).

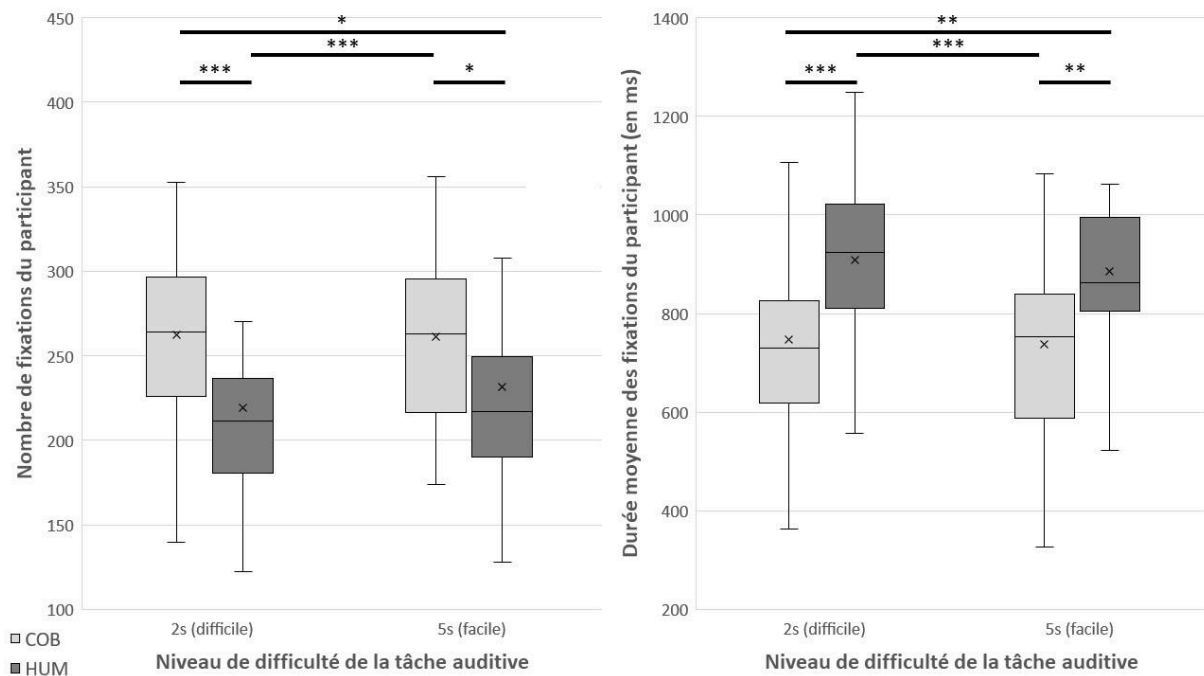


Figure 35 : Nombre de fixations et durée moyenne des fixation (en ms) pendant un essai. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

La durée moyenne des fixations au cours d'un essai diffère également selon la condition ($\chi^2(3) = 19,941, p < 0,001$) avec une durée moyenne plus importante pour les conditions HUM2s et HUM5s que pour les conditions COB2s et COB5s (Figure 35). La durée moyenne des fixations est plus importante dans la modalité HUM que dans la modalité COB (COB = 750,4 (214,8) ; HUM = 891,2 (154,1) ; $p < 0,01$) mais aucune différence n'est observée entre les modalités de la tâche auditive (2s = 856,1 (179,3) ; 5s = 842,3 (153,1)).

5.2.4.2 Les saccades

L'amplitude moyenne des saccades ainsi que la vitesse moyenne des saccades ne diffèrent pas selon la condition (Tableau 11). De plus, ni l'amplitude ni la vitesse des saccades ne sont différentes entre les deux modalités de la tâche motrice. Il en est de même entre les deux modalités de la tâche auditive.

Tableau 11 : Amplitudes et vitesses moyennes des saccades. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile).

	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s	COB	HUM	2s	5s
Amplitude des saccades (en °)	13,1 (2,4)	13,0 (2,4)	13,7 (3,5)	12,8 (3,0)	13,1 (2,3)	13,1 (3,6)	13,3 (2,9)	13,0 (3,0)
Vitesse des saccades (en °/sec)	331,4 (44,2)	332,5 (44,8)	360,1 (84,2)	347,5 (78,4)	336,2 (43,9)	339,2 (80,2)	338,9 (62,6)	337,5 (52,4)

5.2.4.3 Le coefficient K

Une approximation du coefficient K est calculée pour chaque essai à partir des données de fixations et de saccades. Pour une grande majorité des participants, pour toutes les conditions, l'approximation du coefficient K est comprise entre -0,01 et 0,01 (la condition avec le moins de valeur comprise entre ces deux valeurs est HUM5s avec 9,1% des valeurs légèrement en dehors).

Ainsi, aucun test statistique n'est effectué pour ces résultats.

5.2.4.4 Le diamètre pupillaire

Le diamètre pupillaire diffère selon la condition ($\chi^2(3) = 8,576, p < 0,05$) avec un diamètre plus important pour la condition COB5s que pour les conditions HUM5s et COB2s (Figure 36). Ce diamètre pupillaire ne diffère ni selon les modalités de la tâche motrice (COB = 4,57 (0,63) ; HUM = 4,66 (0,98)) ni selon les modalités de la tâche auditive (2s = 4,60 (0,87) ; 5s = 4,56 (0,86)).

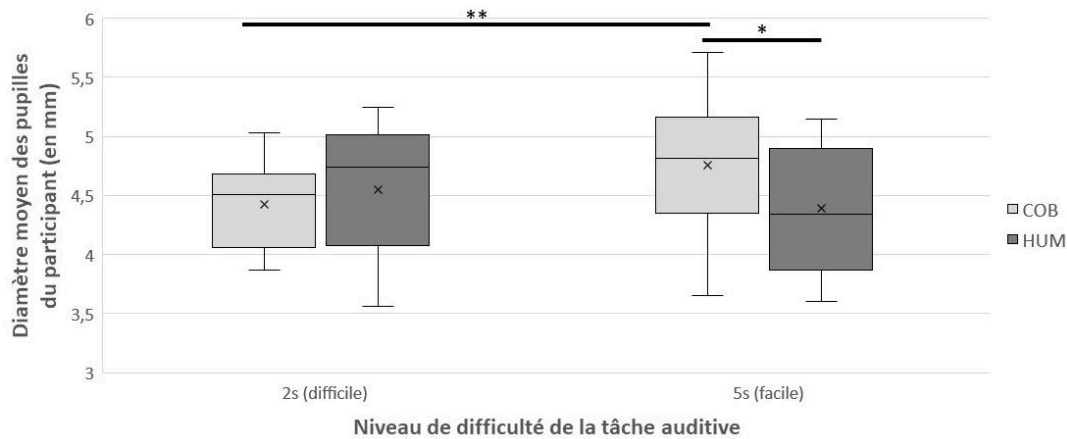


Figure 36 : Diamètre pupillaire moyen pendant un essai. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$

5.2.5 Corrélations

Le nombre de produits fabriqués n'est pas corrélé avec l'erreur absolue moyenne des participants ($p = 0,631$).

Le nombre de produits fabriqués est légèrement corrélé avec les scores RULA moyens des deux côtés (côté droit : $r = 0,2$, $p < 0,05$; côté gauche : $r = 0,251$, $p < 0,01$).

Le nombre de produits fabriqués est fortement corrélé avec le taux d'activité du participant ($r = 0,815$, $p < 0,001$) et avec son taux d'activité directe ($r = 0,715$, $p < 0,001$). De plus ce nombre de produits est légèrement et négativement corrélé au temps moyen d'une activité directe du participant ($r = -0,219$, $p < 0,05$).

Le nombre de produits correctement fabriqués est fortement et négativement corrélé avec le taux de temps mort ($r = -0,745$, $p < 0,001$) et modérément avec le taux de collaboration ($r = 0,599$, $p < 0,001$) mais il n'est pas corrélé avec le taux de collaboration directe ($p = 0,126$).

Le nombre de produits fabriqués est modérément et négativement corrélé avec le nombre de fixations du participant ($r = -0,402$, $p < 0,001$).

Le taux d'activité du participant est fortement corrélé au taux de collaboration ($r = 0,82$, $p < 0,001$). De plus, le taux d'activité directe du participant est modérément corrélé avec le taux de collaboration directe ($r = 0,496$, $p < 0,001$).

Le taux d'activité du participant et son taux d'activité directe sont légèrement corrélés aux scores RULA moyens du côté droit (respectivement $r = 0,259$, $p < 0,01$ et $r = 0,364$, $p < 0,001$) et le sont modérément avec ceux du côté gauche (respectivement $r = 0,372$, $p < 0,001$ et $r = 0,429$, $p < 0,001$). De plus, le temps moyen de ses activités directes est légèrement corrélé aux scores RULA moyens pour les deux côtés (respectivement $r = 0,255$ et $r = 0,25$, $p < 0,01$ pour les deux corrélations).

5.3 Discussion

Cette expérimentation avait pour premier objectif de comparer la même situation de travail collaborative entre un participant et un co-travailleur, soit cobot soit humain. Le second objectif était d'observer l'influence d'une augmentation de la charge cognitive de l'opérateur induite par une seconde tâche. Cette étude a comparé les performances de production entre les deux travailleurs en considérant le nombre de produits fabriqués, donc la cadence de production ; les ressources attentionnelles du participant disponibles par des mesures de ses performances à une seconde tâche ; la fluidité des interactions à travers les actions des deux travailleurs et la synchronisation de leurs actions ; la posture du participant par les positions angulaires des articulations du haut du corps ainsi que les évaluations RULA ; son comportement oculomoteur par ses fixations, ses saccades et la dilatation de ses pupilles.

5.3.1 Influences négatives du cobot par son introduction

5.3.1.1 Dégradation de la production avec l'introduction du cobot ...

Un des facteurs les plus importants concernant la compétitivité d'une entreprise est sa productivité (Tangen, 2005). Dans notre étude, le type de collaboration impacte la cadence de production, avec une plus faible production pour le système humain-cobot (5,35 (0,82) produits en quatre minutes) que pour le système humain-humain (8,03 (1,22) produits en quatre minutes). Ainsi, pour une heure de travail en continu, à ce rythme, la production serait supérieure de quarante produits pour le système humain-humain (environ cent vingt produits) par rapport au système humain-cobot (quatre-vingt produits). La cadence est donc 50% supérieure pour le système humain.

Dans deux études précédentes (Colim et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2020), l'introduction du cobot n'avait pas diminué la productivité, voire l'avait améliorée. Cependant, dans ces deux études, la situation collaborative humain-cobot était comparée à une situation individuelle, et non à une situation collaborative humain-humain comme dans notre étude. De plus, le plan de travail et la distribution des tâches avaient été repensés d'un point de vue ergonomique, puisque les différentes évaluations effectuées dans la situation individuelle avaient permis une redistribution des tâches de travail pour optimiser le processus de production. Ces aménagements peuvent expliquer la différence entre leurs résultats et ceux de notre étude. En effet, ici la situation de départ était déjà collaborative ; et aucun aménagement n'a été effectué entre les deux situations pour optimiser le processus de fabrication par une redistribution des tâches.

5.3.1.2 ... en lien avec une fluidité des interactions moins importante ...

5.3.1.2.1 Un opérateur moins actif et un système moins interactif pour une production moins importante

La différence de production entre les deux systèmes peut être expliquée par le temps de travail effectif du participant (i.e., les mesures de l'activité du participant), mais aussi par le temps passé à travailler au niveau du socle central (i.e., les mesures d'activité directe du participant). La mesure de l'activité du participant dans cette étude correspond à celle du temps de travail dans l'étude de Collewet et Sauermann (2017), défini comme « le temps pendant lequel un agent travaille directement à sa tâche principale »¹³. Cependant, le lien entre heures de travail et productivité dépend de plusieurs facteurs. En effet, la productivité peut augmenter si les coûts d'installation et le temps improductif ne changent pas (DeBeaumont & Singell, 1999 ; Leslie, 1984), peut diminuer avec les effets de la fatigue (DeBeaumont & Singell, 1999 ; Pencavel, 2015) ou alors peut rester stable lorsque ces effets se compensent (Gianella & Lagarde, 1999 ; Kramarz et al., 2008). Le nombre de produits fabriqués, variable témoin de la performance de production, est fortement corrélé avec les taux d'activité et d'activité directe du participant. Ces corrélations semblent indiquer que plus le participant était actif, meilleure était la production.

¹³ the time during which an agent is directly working on his or her main task

Ces résultats sont en cohérence avec une partie de ceux de la littérature, où lorsque le temps de travail augmentait, la production faisait de même (Collewet & Sauermann, 2017 ; Golden, 2012).

Le cobot, étant un robot collaboratif, diffère des robots traditionnels par sa possibilité de travailler en proximité avec un humain tout en sécurité (Hentout et al., 2019). Dans cette situation de travail, le participant et son co-travailleur sont dans le même espace (i.e., le même plan de travail) et ont un but commun (i.e., fabriquer des produits). Ainsi, à partir de la distinction des trois types d'interaction entre un humain et un robot d'Hentout et ses collaborateurs (2019), nous conservons uniquement la coopération, lorsque l'un des deux est actif tandis que l'autre est inactif, et la collaboration, lorsque les deux sont actifs. Nous avons fait le choix de distinguer la coopération et la collaboration selon les actions de chacun, malgré la définition de la collaboration d'Hentout et ses collaborateurs (2019) qui pourrait regrouper ces deux termes. En effet, dans cette étude la tâche motrice est une tâche complexe par la distribution des sous-tâches entre le participant et le co-travailleur et par la nécessaire coordination entre les deux, avec une certaine proximité physique lors du processus d'assemblage. Ce choix a été fait car nous distinguons la proximité physique statique (pour la coopération) de la proximité physique dynamique des deux travailleurs (pour la collaboration). Nous ajoutons les temps morts lorsque les deux sont inactifs, ce qui correspond au « délai fonctionnel » d'Hoffman (2019).

D'une part, les résultats montrent d'une part un taux de collaboration plus important lorsque le participant est face au co-travailleur humain que face au cobot, et inversement pour le taux de temps mort. D'autre part, le taux de temps mort est fortement et négativement corrélé au nombre de produits fabriqués et le taux de collaboration est modérément corrélé au nombre de produits fabriqués. Ces différences pourraient expliquer la meilleure production du système humain par rapport au système hybride.

Concernant les collaborations, une autre distinction a été faite selon la localisation de l'activité du participant. En effet, lorsque celui-ci est en activité directe (i.e., au niveau du socle central), nous parlons de collaboration directe. Les résultats n'ont montré aucune différence concernant les taux de collaboration directe entre le co-travailleur humain et le co-travailleur cobot. Cette absence de différence peut être causée par la séquentialité des sous-tâches des deux travailleurs, ne permettant pas une superposition temporelle de ces sous-tâches. D'ailleurs, le nombre de

produits fabriqués n'est pas corrélé à ce taux de collaboration directe. Ainsi, le temps moyen d'une collaboration directe (non calculé ici car non possible techniquement) pourrait être plus long avec le cobot qu'avec l'humain, mais cela pourrait s'expliquer par les limites du cobot.

5.3.1.2.2 Les limites du cobot à l'origine de la dégradation de la production ?

Le co-travailleur cobot était davantage en inactivité que le co-travailleur humain. Dans cette expérience, lorsque le co-travailleur était un humain, celui-ci pouvait intégrer des informations sur le processus de fabrication en cours lors de ses inactivités (e.g., c'est bientôt à lui d'effectuer sa sous-tâche) tandis que le cobot était complètement inactif et en attente de la commande du participant. Cette inactivité peut donc être perçue comme un problème pour la coordination entre les deux travailleurs et être considérée comme une utilisation inefficace du cobot (Hoffman, 2019). Ici, l'inactivité du cobot était complète, autant physiquement que « cognitivement ». Un cobot capable d'intégrer des informations sur la situation en cours pourrait diminuer ce temps d'inactivité pour améliorer la production.

De plus, le taux d'activité du participant étant plus important lorsqu'il faisait face au co-travailleur humain par rapport au cobot, cette différence peut s'expliquer par deux facteurs : le temps d'inactivité dans la production du cobot ainsi que sa vitesse plus lente que celle de l'humain (comme en témoigne le temps moyen d'une activité du co-travailleur) en raison des normes qui lui sont imposées (e.g., la vitesse de mouvements des bras limitée à 1,5m/s). Malgré la demande faite au co-travailleur humain de ne pas anticiper la fin des actions du participant et d'avoir une coordination dite réactive, comme celle du cobot (Huang et al., 2015), le co-travailleur humain démarrait ses actions plus rapidement que le cobot. En effet, pour que ce dernier débute son action, le participant devait appuyer sur un bouton d'une télécommande pour donner l'ordre au cobot de performer sa sous-tâche suivante. Ainsi, cette étape augmentait encore plus le « temps de réaction » du cobot par rapport à celui de l'humain. Avoir une coordination réactive n'est pas naturel pour un humain qui peut à plus spontanément une coordination pro-active (Huang et al., 2015). Par conséquent, le co-travailleur humain avait une coordination plus adaptative que le cobot. L'expérience de Huang et ses collaborateurs en 2015 a montré que les performances d'une équipe humain-robot étaient meilleures lorsque le robot avait une coordination pro-active, puis dans le cadre d'une coordination adaptative, et étaient moins importantes lorsque celui-ci avait une coordination réactive. Si le co-travailleur humain

avait été pleinement libre de ses actions, avec une coordination complètement pro-active, la production aurait certainement été encore plus importante pour le système humain et l'écart avec les performances du système hybride encore majoré.

Les coordinations différentes entre les deux co-travailleurs pourraient donc être une des raisons du plus grand temps de collaboration entre le participant et l'humain, et par conséquent de la meilleure production. Changer la coordination du cobot, pour qu'elle devienne adaptative, voire proactive (Huang et al., 2015), pourrait augmenter ce temps de collaboration et donc augmenter la fluidité des interactions entre le participant et le cobot. Par conséquent, cela améliorerait indirectement la productivité (Hoffman & Breazal, 2007 ; Perez-D'Arpino & Shah, 2015).

La communication au sein du système hybride était moins importante que dans le système humain, constituant une autre différence entre les deux systèmes. Pour rappel, la communication verbale avait été interdite entre les deux humains car elle n'était techniquement pas possible avec le cobot. Les seules communications non verbales entre le participant et le cobot correspondaient à la posture mais aussi à la gestuelle du cobot, à l'interface et aux contacts physiques. Avec le co-travailleur humain, la communication non verbale pouvait également se faire par le regard, mais la posture et la gestuelle du participant donnaient également des informations au co-travailleur humain tandis que le cobot ne pouvait ni les capter ni les intégrer. Ces informations visuelles permettaient au co-travailleur humain de démarrer ses actions en fonction de la fin des actions de son collègue (le participant), augmentant ainsi la fluidité de l'interaction (Hoffman & Breazal, 2007) et l'efficacité de la collaboration (Perez-D'Arpino & Shah, 2015). De ce fait, les informations visuelles captées par le co-travailleur, donc la meilleure communication non verbale entre les deux travailleurs, ont amélioré la fluidité des interactions. De plus, le cobot, ne possédant pas de capacité de perception et de traitement de ces informations pour adapter ses actions à celles de l'autre travailleur (ici le participant), freine la production par ses limites techniques. Les capacités perceptives du co-travailleur humain ont permis une meilleure communication entre les deux travailleurs, communication importante pour la performance collective (Fowler et al., 2008). Si le cobot est capable d'anticiper les actions de l'humain et de communiquer avec celui-ci, contrairement à celui de notre expérimentation, la fluidité des interactions pourrait être améliorée. En effet, cela induirait une réduction du temps d'inactivité du cobot et concomitamment une augmentation de son temps d'activité (Hoffman & Breazal, 2007), ce qui pourrait indirectement augmenter la productivité.

5.3.1.2.3 Une mauvaise intégration du cobot dans le processus de fabrication ?

Le co-travailleur était la majeure partie du temps en inactivité, et l'était d'autant plus lorsque celui-ci était l'humain (69,3% du temps de travail) que lorsque c'était le cobot (62,9% du temps de travail).

Les sous-tâches pour la production étaient distribuées de manière séquentielle entre le participant et le co-travailleur. En fait, lorsque l'un des deux finissait une sous-tâche, ou était en train de la terminer, l'autre débutait la sienne.

Le participant était majoritairement en activité, en étant actif plus souvent lorsqu'il était face à l'humain (92,0% du temps de travail) que face au cobot (71,4% du temps de travail). Ainsi le temps d'inactivité du participant est environ trois fois plus important face au cobot que face à l'humain. Il est à noter également que chaque inactivité était plus longue pour le participant lorsqu'il était face au cobot. L'augmentation de ce temps d'inactivité en travaillant avec le cobot pourrait augmenter le sentiment d'ennui et de temps perdu perçus par le participant (Hoffman, 2019) et réduire la fluidité du travail de l'équipe (Hoffman & Breazal, 2007).

D'une part, ces résultats indiquent une répartition inégale du temps de travail entre le participant et son co-travailleur, avec le participant qui avait un temps de travail effectif plus important. D'autre part, malgré la coordination réactive demandée au co-travailleur humain, l'inactivité du participant était réduite en comparaison à celle avec le co-travailleur cobot. En effet, le co-travailleur humain conservait tout de même une part de coordination pro-active car celle-ci est naturelle pour lui. Cette diminution du temps d'attente avec un co-travailleur humain, liée à cette coordination, a déjà été observée dans la littérature (Shah et al., 2011). Ainsi, le délai fonctionnel avec l'humain était moins important que celui avec le cobot (Hoffman & Breazal, 2007), augmentant le sentiment de fluidité entre les deux travailleurs (Hoffman, 2019).

En s'intéressant plus spécifiquement à la subdivision dans les activités du participant et à la dichotomie activité directe / activité indirecte, les participants étaient plus actifs au niveau du socle central, donc directement sur le produit, lorsqu'ils travaillaient face à l'humain (56,8% du temps de travail) que face au cobot (38,1% du temps de travail). Cependant, le co-travailleur n'a pas influencé le temps moyen d'une activité directe. Le participant prenait le même temps pour effectuer une sous-tâche lorsqu'il était face au cobot ou face à l'humain. En revanche, le temps moyen d'une activité du co-travailleur était plus important pour le cobot que pour

l'humain. Ainsi le co-travailleur humain réalisait les sous-tâches plus rapidement que le co-travailleur cobot. La différence de vitesse d'exécution du co-travailleur n'a pas influencé celle du participant. Par conséquent, aucune contagion motrice n'a été observée. La contagion motrice a déjà été observée lors d'interactions humain-humain (Bisio et al., 2010, 2014 ; Noy et al., 2009) et lors d'HRI (Bisio et al., 2014 ; Vasalya et al., 2018). Cependant, lors des HRI, ces interactions étaient des coopérations, voire des coexistences, avec les mêmes mouvements à exécuter pour l'humain et le robot. A notre connaissance, la contagion motrice lors d'une collaboration entre un humain et un robot n'a pas été étudiée dans la littérature. En fait, dans notre étude, le temps d'activité directe était corrélé au nombre de produits fabriqués. Ainsi, l'augmentation du temps d'activité sur le socle central par le participant est liée à celle du nombre de sous-tâches effectuées.

5.3.1.3 ... et une modification de la stratégie d'exploration visuelle ainsi qu'une augmentation de la charge cognitive

L'attention visuelle a été évaluée à partir du comportement oculomoteur du participant, c'est-à-dire à partir de ses fixations et de ses saccades. Les résultats montrent que les fixations étaient plus nombreuses lorsque la fabrication de produits s'effectuait avec le co-travailleur cobot qu'avec l'humain. Cependant, ces fixations étaient plus longues avec l'humain que le cobot. Concernant les saccades, ni l'amplitude moyenne ni la vitesse moyenne ne différaient selon le co-travailleur.

Les fixations moins longues, et par conséquent plus nombreuses, face au co-travailleur cobot semblent indiquer un comportement oculomoteur en mode ambiant, tandis que lorsque le participant est face au co-travailleur humain, ce comportement semble être en mode local (Unema et al., 2005). En fait, face au co-travailleur cobot, le participant cherchait à analyser et à identifier son environnement visuel alors que face au co-travailleur humain la récupération des informations se faisait dans des zones spécifiques. En revanche, l'utilisation de l'approximation du coefficient K dans notre étude n'a pas permis de confirmer ces résultats. L'absence de différence entre les deux systèmes pourrait être liée au fait que c'est une approximation de ce coefficient. En effet, pour des raisons techniques lors du traitement des données, il n'a pas été possible d'utiliser le coefficient K (Krejtz et al., 2016, 2017).

L'environnement de travail ainsi que le but de la tâche étaient quasiment similaires pour les deux systèmes, à l'exception du co-travailleur qui différait dans l'environnement pour le participant. Il est également à noter que malgré la production plus importante avec l'humain, et par conséquent le nombre plus important d'étapes de production effectuées, le participant effectuait moins de fixations que face au co-travailleur cobot, ces deux variables étant négativement corrélées. Ainsi, malgré le plus faible nombre d'étapes de production effectuées par le participant dans le système hybride, l'exploration visuelle était plus intense que dans le système humains (Liechty et al., 2003). Ainsi, le fait de travailler avec un co-travailleur cobot a augmenté l'intensité de l'exploration visuelle, en augmentant la quantité d'informations extraites par le participant, en comparaison à la même situation avec un co-travailleur humain.

Une étude récente a comparé les comportements oculomoteurs de cinq participants dans la réalisation d'une tâche collaborative dans un système humain et un système hybride (Mariscal et al., 2020). Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les deux systèmes concernant le nombre de fixations, leur durée moyenne et le diamètre pupillaire. Cependant, le faible nombre de participants pourrait expliquer cette absence de différence significative. En effet, il semblait que quatre participants sur cinq effectuaient plus de fixations, et de plus longue durée, sur la zone de travail du co-travailleur lorsque le cobot agissait, comparativement au co-travailleur humain. De plus, le temps pour réaliser la tâche était plus important pour le système hybride que pour le système humain pour la totalité des participants.

Dans notre étude, la demande attentionnelle a été mesurée par les performances à une seconde tâche auditive. Les résultats ont montré que ces performances ne différaient pas selon le système dans lequel était le participant. Ainsi, les performances similaires à cette tâche semblent indiquer que le co-travailleur, humain ou cobot, n'influence pas la demande attentionnelle de l'opérateur. Cependant, en s'intéressant uniquement au niveau de difficulté le plus élevé de la tâche auditive (i.e., 2s), il a été observé que l'erreur absolue était plus importante face au co-travailleur cobot que face au co-travailleur humain. Ainsi, la demande attentionnelle semblait être plus forte avec le cobot qu'avec l'humain. En effet, il a été montré qu'une augmentation de la difficulté à la tâche principale, motrice, diminuait les performances à la seconde tâche par une augmentation du coût cognitif (Beauchet et al., 2005 ; Dennis et al., 2009 ; England & Granata, 2007 ; Patel et al., 2014).

5.3.2 Influences bénéfiques du cobot par son introduction : amélioration de la posture et réduction des contraintes biomécaniques sur l'opérateur

Nous avons vu précédemment que le système hybride était moins performant en termes de production que le système humain, avec moins d'activité pour les deux travailleurs, des interactions moins fluides ainsi qu'une modification de l'exploration visuelle et une augmentation de la charge cognitive. Or, le système hybride semble présenter des avantages par rapport au système humain, notamment concernant la posture des participants au niveau de ses membres supérieurs et de son tronc.

5.3.2.1 Les évaluations RULA comme premier témoin de la meilleure posture générale de l'opérateur dans le système hybride...

Pour rappel, l'évaluation RULA quantifie le risque d'apparition de TMS en calculant un score compris entre 1 et 7 à partir des angles articulaires du dos, de la nuque et des articulations du membre supérieur (McAtamney & Corlett, 1993). Plus le score est élevé, plus la posture est à risques.

Pour les évaluations des deux côtés, les scores moyens observés étaient moins importants dans le système hybride que dans le système humain. De plus, en s'intéressant aux temps passés dans des postures à risques, celles-ci (i.e., r4, r5 et r6) étaient plus fréquentes dans le système humain que dans le système hybride, et inversement pour des postures moins à risques (i.e., r3).

Ces différents résultats indiquent donc que la posture du tronc et des membres supérieurs pour la réalisation d'une tâche collaborative était plus à risques dans le système humain que dans le système hybride. Il avait été montré dans des études précédentes que l'introduction d'un cobot dans une tâche de travail individuelle réduisait les contraintes sur la posture de l'opérateur (Colim et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2020). A notre connaissance, il n'existe pas d'étude qui compare la posture d'un opérateur réalisant la même situation de travail dans un système humain et dans un système hybride. Ainsi, dans notre étude, l'introduction du cobot dans la tâche de travail collaborative a diminué les contraintes sur l'opérateur.

5.3.2.2 ... appuyées par certaines articulations moins sollicitées dans le système hybride

L'évaluation RULA donne un score pour le tronc et un des membres supérieurs. Il est également possible de s'intéresser plus précisément à chaque articulation de l'opérateur pour observer les répercussions de l'introduction d'un cobot sur ces articulations.

Concernant les scores RULA pour chaque articulation, les résultats ont montré une posture moins à risques pour le dos, les deux épaules et les deux coudes face au co-travailleur cobot. Les positions moyennes des flexions de ces articulations sont plus éloignées de leur position optimale face au co-travailleur humain (Moore et al., 2011). Ainsi, ces articulations sont davantage sollicitées et une plus grande sollicitation musculaire est donc nécessaire pour réaliser les mêmes mouvements (Chaffin et al., 2006 ; Gooyers & Stevenson, 2012 ; Jain et al., 2019 ; Moore et al., 2011 ; Roman-Liu & Tokarski, 2005).

Ces résultats témoignent donc d'une diminution des sollicitations sur l'opérateur et d'une amélioration de la posture du travailleur au niveau des articulations les plus proximales du membre supérieur et au niveau du dos, lorsqu'il est face au cobot. L'introduction du cobot semble donc améliorer la posture et indirectement réduire les risques de développer des TMS, sans déplacement de ces risques à une nouvelle articulation.

5.3.3 Amélioration de la posture de l'opérateur : par l'introduction du cobot ou par la réduction de la cadence de production ?

Il est donc observé une amélioration de la posture des opérateurs lorsqu'ils sont avec le co-travailleur cobot. Cependant, cette amélioration est-elle due au fait que l'opérateur travaille avec le cobot ou est-elle due à la réduction de la cadence de production, donc indirectement à la réduction de l'activité du travailleur ? En effet, plus un opérateur est actif et plus le risque de développer des TMS est important, en raison d'une répétition plus importante du nombre de gestes à effectuer (Mathiassen & Winkel, 1996).

Il a été observé ici que les scores RULA des participants étaient légèrement corrélés avec le nombre de produits fabriqués, mais aussi légèrement et modérément (côtés droit et gauche respectivement) corrélés avec leurs taux d'activité et d'activité directe. Ces corrélations

semblent appuyer l'idée que la réduction de la cadence pourrait être à l'origine des sollicitations moindres sur l'opérateur.

Dans cette étude, il a également été calculé les scores RULA pendant les différentes actions du participant. Ces mesures permettent de comparer la posture du participant lorsqu'il effectue les mêmes actions motrices (ou aucune action motrice en Inactivité) face aux deux co-travailleurs. Pour les trois actions du participant (i.e., inactivité, activité directe et activité indirecte), les scores étaient à chaque fois inférieurs avec le co-travailleur cobot. Ainsi, malgré un plan de travail et des actions similaires, travailler face au cobot semble diminuer les contraintes sur l'opérateur en améliorant sa posture. Ces résultats, au contraire des corrélations précédentes, semblent appuyer l'idée que le changement de co-travailleur pourrait être à l'origine des sollicitations moindres sur l'opérateur.

Les temps moyens d'activité directe du participant ne différaient pas entre les deux systèmes. Ainsi, malgré une vitesse de travail similaire pour réaliser la tâche, la posture était plus à risques avec le co-travailleur humain. Il serait intéressant d'étudier les différences de posture entre les deux systèmes, lors de la réalisation d'un geste similaire, pour évaluer l'influence du co-travailleur dans la réalisation d'un geste. Concernant les temps moyens des inactivités, ceux-ci étaient moins longs avec le co-travailleur humain qu'avec le cobot. Ces temps d'inactivité peuvent être considérés comme des temps perdus pour la production. Cependant ces temps peuvent également être perçus comme du repos (ou de la récupération) du point de vue de l'opérateur (Winkel & Westgaard, 2008).

Par conséquent, ces différents résultats ne permettent pas de statuer sur le poids des différents facteurs de l'amélioration de la posture des participants avec le co-travailleur cobot. En effet, l'amélioration de la posture semble être liée à la diminution du temps de travail de l'opérateur avec le cobot mais aussi à sa présence en face, à la place de l'humain. Ces résultats nous ont donc conduit à réaliser une seconde étude dans ce travail de thèse, étude qui cherche à explorer les effets de ces deux hypothèses concernant l'amélioration de la posture de l'opérateur dans le système hybride.

5.3.4 Influence du niveau de difficulté de la seconde tâche

5.3.4.1 La performance de production non influencée par l'augmentation de la charge cognitive induite par la seconde tâche.

Les participants étaient placés dans une situation de double tâche, l'augmentation du niveau de difficulté de la seconde tâche a demandé davantage de ressources attentionnelles à ceux-ci pour la réaliser (Baddeley et al., 1997 ; Pashler, 1994). Or, dans notre étude, les participants n'ont pas réussi à mobiliser suffisamment de ressources pour ne pas dégrader la performance à la tâche cognitive lorsque celle-ci était plus difficile. Ces résultats concordent avec ceux d'études précédentes (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Richer & Lajoie, 2019), où la tâche auditive avec un IIS de deux secondes correspondait à un niveau de difficulté plus important que cette même tâche avec un IIS de cinq secondes. De plus, dans ces deux études, la perception de la difficulté de la tâche concordait avec les résultats obtenus (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Richer & Lajoie, 2019).

Cette tâche auditive était une tâche de mémoire de travail comme défini par Al-Yahya et ses collaborateurs (2011) puisqu'elle réfère à « une tâche qui nécessite de maintenir à l'esprit une information disponible pour le traitement »¹⁴. Dans un contexte de double tâche dont une tâche de mémoire de travail, la plupart des études utilisaient des tâches simples et automatiques (telles que le contrôle postural) et observaient une amélioration de la performance à la tâche principale en situation de double tâche par rapport à la tâche simple (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Richer & Lajoie, 2019) ou des modifications des paramètres spatio-temporels de la marche (Dubost et al., 2008). Dans les études utilisant les membres supérieurs dans la tâche principale, dite simple nécessitant peu de degrés de libertés, les résultats observés étaient contradictoires : tantôt la performance était dégradée tantôt elle ne l'était pas (Gruber, 2011 ; Serrien, 2009). Pour une tâche plus complexe, il a été montré que l'automatisation de celle-ci permettait de réduire l'influence de la seconde tâche sur la tâche principale (Krajenbrink et al., 2018). Dans notre étude, la tâche principale (i.e., la tâche motrice) correspondait à une tâche complexe, non automatisée, utilisant les membres supérieurs.

¹⁴ tasks that require holding information in the mind which is available for processing

5.3.4.2 Interactions

Le niveau de difficulté de la tâche auditive a influencé le comportement de l'opérateur car celui-ci était en moyenne plus souvent inactif lorsque la tâche auditive était la plus difficile. Il a été vu précédemment que le niveau le plus difficile requérait davantage de ressources attentionnelles que le niveau le plus facile (Baddeley et al., 1997 ; Pashler, 1994). Ainsi, la demande attentionnelle de la seconde tâche plus importante dans la modalité 2s, a influencé les actions du participant en réduisant son temps de travail actif pour la fabrication des produits. Dans une étude précédente (Patel et al., 2014), les auteurs ont comparé l'influence de différentes tâches cognitives sur la vitesse de marche. Ils ont observé une diminution de cette vitesse, voire des arrêts pour certaines tâches, lorsque cette seconde tâche leur demandait trop de ressources attentionnelles pour performer à la tâche motrice.

De plus, il a été observé que les phases d'activité directe du participant étaient plus courtes avec la tâche auditive la plus difficile, quelle que soit la nature du co-travailleur. De même, les phases d'inactivité du participant étaient en moyenne plus longues lorsque la tâche auditive était la plus difficile, mais uniquement face au co-travailleur cobot. Nous pouvons donc nous interroger sur la priorisation des tâches effectuées par le participant. En effet, il a accéléré ses mouvements lors de ses actions sur le produit tandis qu'il attendait plus longtemps avant de réaliser sa prochaine action lorsqu'il était face au cobot co-travailleur, permettant donc des temps plus importants pour diriger ses ressources attentionnelles pour la réalisation de la tâche auditive. Il semblerait donc que la tâche auditive soit davantage priorisée lorsque davantage de ressources attentionnelles sont nécessaires à sa réalisation, d'autant plus lorsque le participant se trouve face au co-travailleur cobot. Ainsi, travailler en interaction avec le cobot semble augmenter l'influence du niveau de difficulté de la seconde tâche sur la réalisation de la tâche collaborative par l'opérateur humain.

Concernant les interactions dans les deux systèmes, le temps de collaboration directe a été influencé par la tâche auditive en réduisant ce temps lorsque la tâche était difficile, mais les autres interactions n'ont pas été influencées. Par conséquent, la demande attentionnelle plus importante de la seconde tâche a modifié le comportement du travailleur humain en réduisant son activité lui permettant de consacrer davantage de temps et de ressources attentionnelles pour performer à la tâche auditive. Toutefois, cette demande attentionnelle plus importante n'a

que légèrement influencé négativement les interactions entre les deux membres de chaque système.

Dans notre étude, les deux niveaux de difficulté de la tâche auditive ont permis d'homogénéiser la demande attentionnelle supplémentaire pour les participants, mais aussi de comparer deux niveaux de cette demande. Or, ces résultats ont été observés lors de la réalisation d'une tâche artificielle dans un contexte de laboratoire. Et, dans une situation de terrain, plus écologique, les opérateurs sont souvent confrontés à une situation de multitâches. En effet, des tâches de chargement ou déchargement peuvent être imputées à l'opérateur sur son poste de travail, en parallèle de sa tâche principale. L'opérateur peut également avoir à gérer le bruit ambiant autour de son poste ou des interactions verbales ou non avec d'autres collègues. Ainsi, l'opérateur ne réalise pas uniquement sa tâche, mais est confronté en parallèle à d'autres tâches nécessitant des ressources cognitives.

5.3.4.3 Facteurs humains : posture et comportement oculomoteur

Concernant les contraintes biomécaniques au niveau de la posture (i.e., scores RULA et position angulaire), le niveau de difficulté de la tâche auditive a influencé les scores RULA du côté droit pour l'ensemble d'un essai et lorsque le participant était en activité directe, donc au niveau du socle central. Ainsi, la posture semble avoir été dégradée pour le côté droit lorsque la demande attentionnelle de la seconde tâche était plus forte. Dans le modèle dynamique de l'INRS (Uguen et al., 2018), les différents facteurs de TMS (cf., 1.6.1.3 Les causes multifactorielles d'apparition de TMS) ont des liens entre eux. Dans cette étude, nous observons que l'augmentation de la demande attentionnelle (facteur psychosocial) a influencé la posture de l'opérateur (sollicitations biomécaniques). Par conséquent, en effectuant une seconde tâche, l'opérateur peut voir sa demande attentionnelle influencer d'autres facteurs humains rendant plus à risques la tâche principale effectuée.

Pour les comportements oculomoteurs, aucune influence du niveau de difficulté de la tâche auditive n'a été observée, excepté pour le diamètre pupillaire du participant lorsqu'il travaillait avec le co-travailleur cobot. Le diamètre pupillaire est une mesure qui témoigne de la charge cognitive d'une personne (van der Wel & van Steenbergen, 2018). Dans notre étude, la pupille semblait plus dilatée face au cobot avec la tâche auditive la plus facile par rapport à la tâche

auditive la plus difficile. Ce résultat ne concorde pas avec la littérature où le diamètre pupillaire est plus important lorsque la charge cognitive est plus grande (van der Wel & van Steenbergen, 2018). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que lorsque les participants se trouvaient face au co-travailleur cobot avec la tâche auditive la plus difficile, ils délaissaient cette seconde tâche au profit de la tâche principale. En effet, l'erreur absolue à la tâche auditive témoigne d'une baisse de performance à cette seconde tâche dans cette situation expérimentale (i.e., COB2s) par rapport au fait de travailler avec un co-travailleur humain (i.e., HUM2s). Cependant, l'utilisation du diamètre pupillaire comme seul témoin de la charge cognitive est critiqué dans la littérature (Beatty & Lucero-Wagoner, 2000 ; Duchowski et al., 2018), car cette mesure est sensible à d'autres facteurs tels que l'éveil ou la luminosité. Malgré une volonté de contrôler la luminosité dans la pièce des expérimentations, celle-ci n'était pas entièrement maîtrisée et a pu influencer les valeurs du diamètre pupillaire, puisque l'environnement du participant était différent pour l'opérateur selon le co-travailleur (cobot ou humain).

5.4 Conclusion

Cette étude avait deux objectifs principaux.

Le premier objectif était de comparer une même situation de travail collaboratif pour un opérateur où seul le co-travailleur variait entre un humain et un cobot (i.e., comparaison d'un système humain avec un système hybride) pour évaluer la production, la posture des opérateurs, la qualité des interactions entre les deux travailleurs et le comportement visuel. Ainsi, la présence du cobot modifie ces différents comportements. Tout d'abord, la performance de production est dégradée dans cette situation de travail avec ce robot collaboratif. Cette diminution semble liée à la détérioration de la qualité des interactions avec plus de temps d'attente pour le travailleur et plus de temps morts entre les deux entités au détriment du temps de travail sur le produit et de la collaboration. Cependant, le risque d'apparition de troubles musculosquelettiques chez les opérateurs semble plus faible avec la présence du co-travailleur cobot. En effet, la posture du travailleur semble moins à risques lorsque celui-ci est avec le cobot, avec une réduction des contraintes notamment sur les articulations du dos, de l'épaule et du coude dans cette situation. L'introduction du cobot semble modifier le comportement oculomoteur du travailleur avec une exploration visuelle plus intense en présence du cobot. Pour résumer, le système hybride dans une situation de travail collaboratif, en comparaison au

système humain, réduit la productivité mais améliore la posture de l'opérateur, donc sa santé à long terme.

Le second objectif était d'évaluer les impacts de deux niveaux de difficulté d'une seconde tâche, donc indirectement les impacts de la demande cognitive de l'opérateur, sur la production, sa posture, la qualité des interactions entre les deux travailleurs et le comportement visuel. Augmenter le niveau de difficulté de la tâche auditive, ce qui signifie augmenter la demande cognitive, ne modifie pas les performances de production. Cependant, cette augmentation semble en partie modifier la qualité des interactions. En effet, le travail collaboratif directement sur le produit (i.e., la collaboration directe ici) diminue quand la demande cognitive augmente, à travers une vitesse d'exécution des sous-tâches plus importante. En plus d'une partielle dégradation de la qualité des interactions, la posture est également impactée avec quelques détériorations de celle-ci. Le comportement oculomoteur lui ne semble pas impacté par cette demande plus importante. Une haute demande cognitive semble donc modifier certains comportements du travailleur, avec des effets qui peuvent être négatifs sur sa posture.

Ainsi, d'une part l'introduction du cobot dans un système collaboratif modifie les performances de travail ainsi que les comportements de l'opérateur. Malgré une baisse de performance liée à une diminution des interactions entre les deux travailleurs, la posture des opérateurs semble moins à risques avec l'introduction du cobot. Cependant, ces résultats posent questions quant aux causes de ces modifications. Est-ce uniquement la présence du cobot à la place de l'humain qui implique ces modifications ? Ou est-ce la cadence de production, libre ici, qui est à l'origine de ces changements ? D'autre part, il est important de prendre en considération toutes les contraintes de l'environnement et leurs impacts sur la charge cognitive de l'opérateur, puisqu'une augmentation de la charge cognitive (e.g., une augmentation du score au NASA-TLX) est un facteur direct d'apparition de TMS mais aussi indirect avec la modification de la posture de l'opérateur.

6 ETUDE 2 : IMPACT DE DEUX PARAMETRES DE LA CADENCE SUR LA PERFORMANCE ET LES FACTEURS HUMAINS DANS UN SYSTEME HYBRIDE COLLABORATIF

L'Etude 1 avait pour objectif principal de comparer un système humain et un système hybride lors de la réalisation d'une même situation de travail collaboratif de fabrication d'un produit. La seule modification dans l'environnement du participant, ayant un rôle similaire à celui d'un opérateur dans une tâche de travail écologique, était son co-travailleur, qui était soit un humain (système humain) soit un cobot (système hybride).

Cette étude a montré que le système hybride était moins productif que le système humain. La productivité moins importante du système hybride pouvait s'expliquer par une détérioration des interactions entre les deux travailleurs pour le système hybride par rapport au système humain, en raison des différentes limites du cobot. Ainsi, le participant était plus souvent en attente avec le co-travailleur cobot qu'avec le co-travailleur humain, impliquant une diminution du temps de travail sur le produit. De plus, il a été observé que la posture des participants était moins à risque de développer des TMS que dans le système humain, avec notamment une réduction des sollicitations biomécaniques au niveau des articulations du dos, de l'épaule et du coude.

Cependant, ces résultats de l'Etude 1 nous ont interrogés sur les causes de ces modifications. Bien que la productivité moindre du système hybride puisse être causée par les limites du cobot dans cette situation expérimentale, la réduction des contraintes biomécaniques pourrait être causée par le cobot en lui-même mais aussi par la réduction de la cadence de production. Concernant l'hypothèse selon laquelle la réduction de ces contraintes serait causée par le cobot en lui-même, nous avons observé une diminution des sollicitations biomécaniques face au cobot par rapport à face à l'humain lorsque les participants réalisaient les mêmes gestes (i.e., scores RULA moyens pendant les activités directes du participant). En revanche, concernant l'hypothèse selon laquelle la réduction serait causée par la baisse de la cadence de production, des corrélations ont été observées entre le nombre de produits fabriqués et les scores RULA moyens dans l'Etude 1. Cela corrobore des résultats déjà obtenus dans la littérature (Mathiassen & Winkel, 1996).

Pour comprendre les causes de l'amélioration de la posture dans l'Etude 1, cette Etude 2 a pour but d'évaluer les répercussions de modifications de paramètres de la cadence de production

(i.e., meneur et vitesse) sur la production et sur différents facteurs humains. Ainsi, l'Etude 2 avait deux objectifs. Le premier était d'analyser les répercussions de plusieurs vitesses de cadence imposée au travailleur humain dans une interaction humain-cobot en termes de performances de production, d'interactions entre les travailleurs du système hybride et sur les facteurs humains. Le second était d'analyser les répercussions du fait de mener la cadence ou de la suivre pour un travailleur humain, à une vitesse de cadence théorique similaire, dans une interaction humain-cobot en termes d'efficacité de production, d'interactions entre les travailleurs du système hybride et sur les facteurs humains.

Dans l'Etude 2, la situation de travail est similaire à celle de l'Etude 1 (même tâche, même cobot, même plan de travail) et ce sont les paramètres de la cadence de production (différents meneurs et différentes vitesses) qui sont modifiés. Concernant les mesures des facteurs humains, la posture des participants est mesurée avec la même méthode que dans l'Etude 1 (RULA). La charge cognitive avec la seconde tâche était à la fois utilisée comme variable d'intérêt (i.e., avec deux niveaux de difficulté) et à la fois comme mesure dans l'Etude 1. Puisqu'aucun résultat significatif d'interaction avec l'hypothèse principale n'a été observé dans l'Etude 1, cette seconde tâche a un rôle uniquement de mesure dans l'Etude 2 avec le niveau de difficulté le plus difficile (2s). L'oculomètre pouvait également renseigner sur la charge cognitive de l'opérateur en mesurant le diamètre pupillaire. Cependant, l'oculomètre n'est pas utilisé dans l'Etude 2 en raison du coût du traitement des informations qui peuvent être utilisées par rapport aux bénéfices de ces informations (i.e., les résultats obtenus ne sont que peu exploitables). Dans cette Etude 2, le questionnaire NASA-TLX permet de mesurer cette charge de manière subjective. Enfin, un cardiofréquencemètre a été ajouté dans l'Etude 2 afin de mesurer le stress.

Deux hypothèses ont été émises pour cette Etude 1.

Hypothèse 1 : Lorsque la cadence imposée par un cobot augmente, les participants : fabriqueront plus de produits avec plus d'erreurs de production (productivité), auront plus d'interactions de haut niveau (qualité des interactions), auront une dégradation de la posture avec un risque TMS associé plus important (solllicitations biomécaniques), auront davantage d'erreurs à la seconde tâche (ressources attentionnelles) et auront une augmentation du score au NASA-TLX (charge de travail perçue).

La seconde était que le fait d'être le meneur de la cadence, par rapport au fait d'en être le suiveur, augmente l'efficacité de production et les interactions mais diminue les risques d'apparition de TMS pour le travailleur humain (avec une réduction des sollicitations biomécaniques, de la demande attentionnelle, de la charge de travail perçue et du stress).

Hypothèse 2 : Lorsque les participants seront le meneur de la cadence, comparé à une cadence imposée moyenne par le cobot : ils fabriqueront plus de produits (productivité), auront plus d'interactions de haut niveau (qualité des interactions), auront une meilleure posture avec un risque TMS associé moins important (sollicitations biomécaniques), auront moins d'erreurs à la seconde tâche (ressources attentionnelles), et auront une augmentation du score au NASA-TLX (charge de travail perçue).

6.1 Méthode

6.1.1 Participants

Une population de 20 personnes volontaires, entre 18 et 30 ans est recrutée ($21,1 \pm 2,0$ ans, 11♂ et 9♀). Ils ne présentent aucune déficience affectant ni le contrôle moteur ni le comportement attentionnel. La population recrutée est constituée d'étudiants, et non d'opérateurs. Ainsi les participants ne sont pas familiers du travail en contact avec des robots/cobots. Parmi ces vingt participants, six ont déjà participé à l'Etude 1, les passations de cette Etude 2 ayant eu lieu environ dix mois après celles de l'Etude 1.

Tous les participants ont donné leur consentement écrit avant leur participation.

6.1.2 Matériel et tâches

6.1.2.1 La tâche motrice : fabrication de produits en collaboration avec un cobot

6.1.2.1.1 La cadence de production : le participant meneur ou le cobot meneur à différentes vitesses

Cette tâche motrice s'effectue en collaboration entre un participant et un cobot dans un système hybride. L'objectif de la tâche est similaire à celle de l'Etude 1 : fabriquer des produits en

collaboration. Dans l'Etude 1, le participant était toujours le meneur de la cadence de production. Ici, le meneur est soit le participant (modalité DM = Déclenchement Manuel) soit le cobot (modalité AUTO).

Dans la modalité DM, le participant mène la cadence de production tandis que le cobot a une « coordination réactive », c'est-à-dire qu'il agit en réaction à une action du participant (Huang et al., 2015). Le participant donne la consigne au cobot d'effectuer sa prochaine action à l'aide du boîtier situé sur sa droite sur le plan de travail collaboratif. Cette modalité est constituée d'une seule condition : Déclenchement Manuel (condition DM). Dans cette condition, la cadence est libre, le participant ayant reçu pour consigne et objectif de fabriquer un maximum de produits en trois minutes (la consigne est similaire à l'Etude 1).

Dans la modalité AUTO, la cadence de production est menée par le cobot. Ainsi, la cadence est imposée au participant qui doit effectuer ses actions dans les temps laissés par le cobot. Lorsque le participant ne parvient pas à réaliser sa sous-tâche dans la fenêtre temporelle qui lui est allouée, il lui est interdit de l'effectuer lors des fenêtres temporelles suivantes, donc de la « rattraper ». Pour cette modalité, le programme du cobot utilisé pour l'Etude 1 et pour la modalité DM a été modifié pour permettre au cobot de mener la cadence. De plus, le boîtier précédemment posé sur le plan de travail sur la droite du participant a été retiré. Les vitesses de cette cadence ont été calibrées à partir des résultats de l'Etude 1. Pour rappel, avec le cobot comme co-travailleur (condition COB2s) et une cadence moyennée pour trois minutes, les participants ont fabriqué $5,35 \pm 0,5$ produits en quatre minutes. A noter que pour fabriquer un produit, le participant effectue quatre étapes de fabrication. Ainsi, la modalité AUTO se décompose en trois conditions selon la cadence de production à partir de ces résultats, en ayant calibré les cadences lentes et rapides en enlevant et ajoutant respectivement environ deux écarts-types à cette valeur moyenne :

- AUTO-SLOW : 3 produits doivent être fabriqués pour un total de 13 étapes de fabrication¹⁵ en trois minutes ;
- AUTO-MEAN : 4 produits doivent être fabriqués pour un total de 16 étapes de fabrication en trois minutes ;

¹⁵ Dans cette condition, le participant réalise une étape d'assemblage du quatrième produit en raison de contraintes techniques dans la programmation du cobot.

- AUTO-FAST : 5 produits doivent être fabriqués pour un total de 20 étapes de fabrication en trois minutes.

Dans la programmation du cobot, les vitesses de mouvements de celui-ci sont similaires entre les conditions, ce sont les temps d'attente/d'arrêt du cobot qui diffèrent entre les conditions. L'attente de la commande par le participant est supprimée et remplacée par des temps d'attente fixes. Le cobot a désormais une « coordination adaptative » (Huang et al., 2015). Ce sont les temps d'attente qui varient dans la programmation pour faire varier la cadence de production.

6.1.2.1.2 Objectifs de la tâche et processus de fabrication

La tâche motrice dans cette expérimentation est donc la même que celle de l'Etude 1, cependant ici le co-travailleur est toujours le cobot YuMi. Les caractéristiques du cobot n'ont pas changé depuis l'Etude 1. Cependant, la programmation a été modifiée pour les conditions de la modalité AUTO. Le produit à fabriquer n'a pas changé, avec la même répartition des sous-tâches entre le participant et le cobot. De plus, le plan de travail collaboratif est similaire (Figure 23B, cf., 5.1.2.1.1 Objectifs de la tâche et processus de fabrication), avec pour seule différences le retrait du boîtier (initialement situé à droite du participant) qui donnait la commande au cobot et le déplacement de la télécommande à gauche du plan de travail pour démarrer le programme.

L'objectif de la tâche motrice dépend des conditions : soit le participant doit fabriquer un maximum de produits avec le cobot en trois minutes dans la modalité DM ; soit il doit réussir à fabriquer l'ensemble des produits imposés en trois minutes avec le cobot qui mène la cadence dans la modalité AUTO.

Pour débiter la tâche motrice, le participant déclenche le programme du cobot en appuyant sur la télécommande à gauche du plan de travail. Après trois minutes de production, le participant termine ses actions en étant informé de la fin de la tâche par l'enregistrement audio de la tâche auditive. Pour chaque essai, le nombre de produits fabriqués est compté, et pour le dernier produit en cours, le nombre d'étapes achevées est également compté. L'expérimentateur contrôle les produits terminés et vérifie si toutes les étapes sont correctement réalisées (i.e., en retournant le produit celui-ci ne doit pas s'ouvrir et aucune vis ne doit tomber). Le nombre d'étapes réussies est compté ainsi que le nombre de produits réussis. Ces deux variables sont mesurées en valeur absolue (i.e., nombre d'étapes réussies et nombre de produits réussis) et en

valeur relative pour les conditions de la modalité AUTO (i.e., pourcentage d'étapes réussies par rapport au nombre d'étapes à faire et pourcentage de produits réussis par rapport au nombre de produits attendus).

6.1.2.2 La tâche auditive : la seconde tâche à un seul niveau de difficulté

Comme lors de l'Etude 1, les participants sont en situation de double tâche avec une tâche motrice décrite précédemment, et une tâche auditive similaire à celle de l'Etude 1 et à l'expérience de Richer et Lajoie (2019).

Selon le même protocole que l'Etude 1, de nouvelles séries ont été générées aléatoirement sur le logiciel Microsoft Excel 2019, puis de nouveaux enregistrements ont été créés par le logiciel MATLAB R2020a. Le choix de l'enregistrement se fait aléatoirement comme dans l'Etude 1. De plus, les consignes données au participant ainsi que l'objectif de la tâche et les modalités de lancement de l'enregistrement sont également similaires. Cependant, contrairement à l'Etude 1, cette tâche a un seul niveau de difficulté, correspondant à la modalité 2s de l'étude précédente, soit le niveau le plus difficile (Richer & Lajoie, 2019) et dure trois minutes comme la tâche motrice.

Les mesures de performance à cette tâche sont similaires à l'Etude 1 : le taux de réussite (i.e., nombre d'essais avec la bonne réponse sur le nombre d'essais total) et l'erreur absolue entre la réponse du participant et la bonne réponse est calculée (i.e., de combien il s'est trompé).

6.1.2.3 Le codage vidéo pour décrire les interactions entre les participants et le cobot

Comme lors de l'Etude 1, les passations s'effectuent dans la salle 105 de l'AIP Lorrain et sont filmées par la même caméra. Le codage des actions du participant et du cobot (Tableau 1, cf., 5.1.2.3 Le codage vidéo pour décrire les interactions entre les participants et le co-travailleur) ainsi que leurs interactions (Figure 26 , cf., 5.1.2.3 Le codage vidéo pour décrire les interactions entre les participants et le co-travailleur) s'effectue de la même manière que dans l'expérimentation précédente en s'appuyant toujours sur les articles d'Hoffman (2019) et de Neumann et ses collaborateurs (2006).

Pour chaque action du participant et du cobot, le temps de leurs actions est calculé en pourcentage du temps d'un essai (i.e., trois minutes). De plus, le temps médian de chaque action est également mesuré. Pour chacune des interactions, leur temps est calculé en pourcentage du temps d'un essai.

6.1.2.4 La motion capture pour évaluer le risque de développer des TMS

Les participants sont équipés des mêmes capteurs de mouvement que lors de l'Etude 1, placés de manière similaire sur les participants (Schepers et al., 2018). L'analyse des données obtenues par le capteur est également similaire, avec les évaluations RULA (McAtamney & Corlett, 1993).

Par conséquent, pour chaque essai, les scores RULA moyens pour les deux côtés sont calculés, ainsi que les scores RULA moyens pendant les différentes actions du participant pour chaque côté. Le pourcentage de temps passé pour chaque score RULA (i.e., r1, r2, r3, r4, r5, r6 et r7) est calculé pour un essai. Les scores RULA obtenus pour les articulations de la partie centrale et des membres supérieurs à l'aide des tables RULA sont également moyennés tout au long d'un essai. De plus, les angulations moyennes des abductions des deux épaules, ainsi que des flexions des épaules, des coudes, des poignets, de la nuque et du dos sont calculées pour l'ensemble d'un essai.

6.1.2.5 Le cardiofréquencemètre pour évaluer la réponse physiologique à l'environnement de travail

Contrairement à l'Etude 1, les participants sont également équipés d'un cardiofréquencemètre, composé d'un bandeau thoracique Garmin HRM3-SS et d'une montre Garmin Forerunner 230 connectée à celle-ci. Le bandeau thoracique est placé au niveau du torse, juste en dessous du sternum. La montre connectée est posée au niveau du poignet gauche du participant.

Les données sont exportées sur le logiciel GoldenCheetah v.3.5, puis avec un programme MATLAB R2020a, la fréquence cardiaque moyenne est calculée sur l'ensemble des trois

minutes. Les données manquantes dans un enregistrement étaient remplacées grâce à des régressions linéaires entre la valeur précédente et la valeur suivante.

6.1.2.6 Le NASA-TLX pour évaluer la charge de travail

Dans cette étude, la charge de travail est évaluée par un questionnaire standardisé, le NASA-TLX, en version française (Cegarra & Morgado, 2009). Celui-ci est présenté au participant lorsqu'il a terminé les trois essais d'une même condition.

Cet outil est composé de six questions représentant chacune une dimension, le participant y répond avec une échelle de Likert comprise entre 0 et 100 (Figure 37). Ensuite, le participant compare chaque dimension une à une en indiquant laquelle est la plus impliquée dans la réalisation des tâches (Figure 37). Ainsi, un score global au NASA-TLX, compris entre 0 et 100, est calculé pour chaque condition. De plus, la valeur indiquée sur l'échelle de Likert pour chaque dimension est relevée et sera comparée entre chaque condition, mais aussi le score de chaque dimension (i.e., valeur de l'échelle de Likert avec l'importance de chaque dimension) est analysé.

Exigence mentale :
Quelle quantité d'activité mentale et perceptive a été nécessaire pour réaliser la tâche (réfléchir, décider, chercher, etc.) ?

Exigence physique :
Quelle quantité d'activité physique a été nécessaire pour réaliser la tâche (pousser, déplacer, tourner, manipuler, etc.) ?

Exigence temporelle :
Quelle pression temporelle avez-vous ressentie durant l'exécution de la tâche ? Fallait-il gérer la réalisation de la tâche de manière lente (pression temporelle faible) ou de manière rapide (pression temporelle forte) ?

Effort :
Quel effort (mental et physique) avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ?

Performance :
Comment estimez-vous votre performance en ce qui concerne la réalisation de la tâche ? (Quel est votre niveau de satisfaction concernant votre performance ?)

Frustration :
Vous êtes-vous senti satisfait, content, relaxé (= niveau de frustration faible) ou plutôt ennuyé, irrité, stressé (= niveau de frustration élevé) pendant la réalisation de la tâche ?

Pour chaque paire, mettez une croix dans la case correspondant à la dimension la plus utilisée dans la tâche cognitive effectuée :

Exigence mentale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Exigence physique
Exigence mentale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Exigence temporelle
Exigence mentale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Performance
Exigence mentale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Effort
Exigence mentale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau de frustration
Exigence physique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Exigence temporelle
Exigence physique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Performance
Exigence physique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Effort
Exigence physique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau de frustration
Exigence temporelle	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Performance
Exigence temporelle	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Effort
Exigence temporelle	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau de frustration
Performance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Effort
Performance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau de frustration
Effort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Niveau de frustration

Figure 37 : Questionnaire NASA-TLX. A gauche les six échelles pour les six dimensions. A droite la comparaison par paire des dimensions.

6.1.3 Procédure

Avant tout, lorsqu'il arrive, le participant donne son consentement écrit en signant un formulaire, après avoir lu un document d'information résumant la méthodologie de l'expérimentation. Ensuite, les matériels utilisés dans cette étude lui sont présentés visuellement et leurs rôles lui sont expliqués.

Le participant débute la phase d'équipement avec le cardiofréquencemètre. Il place d'abord le bandeau thoracique au niveau du torse avec le capteur positionné sous son sternum. Il attache ensuite la montre connectée à son poignet gauche. Une fois équipé, le participant s'assoit et attend que la montre se connecte au bandeau (i.e., une fréquence cardiaque s'affiche sur l'écran de la montre). Ensuite, le participant est équipé avec la motion capture. Les mesures, l'équipement et la phase de calibration sont similaires à ceux de l'Etude 1 (Schepers et al., 2018). Lorsque la calibration est terminée, le participant bénéficie de plusieurs phases d'apprentissage.

Le participant est placé face au plan de travail collaboratif, face au cobot. Au total, il bénéficie de quatre phases d'apprentissage où aucune performance ou réussite n'est nécessaire pour terminer ces différentes phases. La première phase d'apprentissage concerne la tâche motrice en simple tâche, celle-ci est similaire à la première phase dans l'Etude 1. La deuxième phase concerne la tâche auditive en simple tâche et est également similaire à la deuxième phase de l'Etude 1, cependant seul l'IIS diffère en restant de deux secondes, seul niveau de difficulté appliqué dans ce protocole. La troisième phase correspond à un apprentissage en double tâche en condition DM. Celle-ci correspond à la dernière phase de la première expérimentation à l'exception de la durée qui est de trois minutes et de la tâche auditive qui a uniquement un IIS de deux secondes. Enfin, la quatrième et dernière phase d'apprentissage concerne la tâche motrice en simple tâche en modalité AUTO. Comme pour la première phase d'apprentissage, l'objectif de la tâche lui est indiqué puis les changements avec la modalité DM lui sont expliqués. Ensuite, le participant effectue un essai de trois minutes dans la condition AUTO-MEAN. Il bénéficie de cette quatrième phase à la suite des trois autres lorsqu'il débute par une des conditions AUTO. S'il débute par la condition DM, il bénéficie de cette phase d'apprentissage après avoir réalisé les essais de la condition DM.

Le participant débute soit par la modalité DM avec sa seule condition suivie par les trois conditions de la modalité AUTO, soit l'inverse. Dans le bloc de la modalité AUTO, soit il

effectue les conditions avec la cadence qui augmente de manière crescendo (i.e., AUTO-SLOW puis AUTO-MEAN et enfin AUTO-FAST), soit avec la cadence qui diminue de manière decrescendo (i.e., AUTO-FAST puis AUTO-MEAN et enfin AUTO-SLOW). Par conséquent, il existe quatre schémas de passation possible (Figure 38). Le nombre de participants dans chaque schéma est contrebalancé, soit cinq participants par schéma.

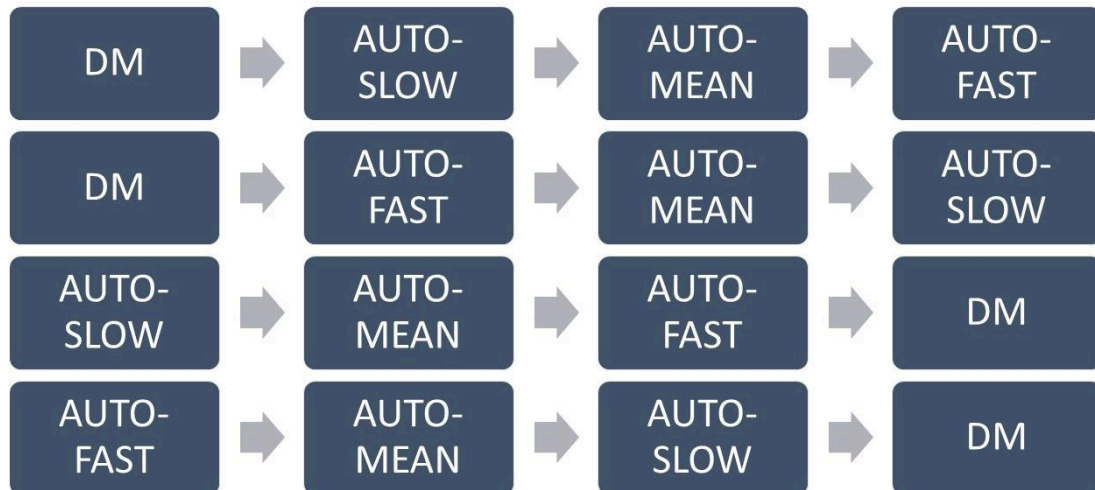


Figure 38 : Schéma de passations possibles

Chaque condition est constituée de trois essais de trois minutes. Entre chaque essai, le participant bénéficie d'une pause de deux à trois minutes, laissant le temps de démonter les produits pour réinstaller le plan de travail collaboratif. Entre chaque condition, les pauses sont d'environ six à sept minutes, laissant le temps au participant de remplir le NASA-TLX.

Pour chaque essai, les différents outils de mesure et les deux tâches (motrice et auditive) doivent être synchronisés. Pour cela, avant chaque essai, le participant pose sa main gauche à plat sur le plateau collaboratif, en collant sa main au socle central (celui-ci se positionne entre le pouce et l'index). Le superviseur déclenche l'enregistrement vidéo de la caméra puis l'enregistrement de la motion capture. Lorsque le superviseur l'autorise, le participant retire sa main rapidement vers l'arrière (comportement facilement identifiable pour synchroniser les différents outils de mesure lors des analyses). Ensuite, il appuie sur le bouton « play » de la télécommande à sa gauche pour démarrer le programme du cobot. Au même moment, le superviseur déclenche la tâche auditive. Juste après avoir déclenché le programme du cobot, le participant déclenche l'enregistrement de sa montre connectée pour mesurer sa fréquence cardiaque.

Au total, le participant est présent dans les locaux environ deux heures et demie pour la réalisation complète de l'expérimentation.

6.1.4 Analyse des données

Les performances aux deux tâches sont manuellement entrées dans le logiciel Microsoft Excel. Pour chaque participant, une valeur moyenne est calculée pour chaque variable à chaque condition (i.e., en moyennant les valeurs des essais de la condition). Concernant les autres variables, les données sont en amont traitées puis exportées par MATLAB, et enfin sont triées de la même manière sur Microsoft Excel.

Le traitement des valeurs aberrantes est similaire à celui de l'Etude 1. Les données inférieures ou supérieures de trois écart-types à la moyenne sont considérées comme des outliers. Celles-ci sont remplacées par la moyenne des données pour les quatre conditions. A la suite d'un problème technique, les enregistrements de la fréquence cardiaque étaient partiellement manquants pour deux participants et intégralement pour un participant. Ces trois participants sont exclus pour les analyses de la fréquence cardiaque. Les tests statistiques effectués sont des tests non paramétriques en raison du nombre peu élevé de participants et dans le but d'homogénéiser les tests statistiques. Ainsi les résultats sont exprimés par la médiane et l'écart interquartile.

Pour toutes les variables, des tests sont effectués pour comparer d'une part les trois conditions de la modalité AUTO (i.e., AUTO-SLOW, AUTO-MEAN et AUTO-FAST) et, d'autre part la condition DM avec les trois conditions de la modalité AUTO. Les différents tests statistiques sont effectués sur le logiciel STATISTICA v.10.

Les performances aux tâches (i.e., nombre de produits fabriqués, nombre d'étapes réussies et erreur absolue à la tâche auditive) sont comparées avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman pour les trois conditions de la modalité AUTO. Puis, un test de Wilcoxon pour échantillons appariés est réalisé, lorsque le premier test est significatif. Ensuite, la condition DM est comparée aux trois autres conditions de la modalité AUTO avec des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés. Concernant les variables relatives aux produits fabriqués et aux étapes réussies pour les conditions de la modalité AUTO, les résultats sont comparés avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman. Lorsque le test

est significatif, un test de Wilcoxon pour échantillons appariés est effectué. Enfin, pour le taux de réussite à la tâche auditive, étant une variable qualitative bimodale (réussite ou échec), des tests du χ^2 sont effectués pour comparer les quatre conditions, ainsi que les deux modalités de la tâche motrice (i.e., DM vs AUTO).

Pour toutes les autres variables (i.e., les temps d'action du co-travailleur et du participant, les temps médians de leurs actions, les scores RULA moyens pour chaque côté, les temps pour les scores RULA, les scores RULA moyens pour chaque articulation, les positions angulaires, les scores RULA moyens pour chaque côté pendant les actions du participant et pendant les interactions, la fréquence cardiaque moyenne, le score global du NASA-TLX, la valeur indiquée sur l'échelle de Likert pour chaque dimension et le score de chaque dimension), des comparaisons intra-individuelles sont faites entre les différentes conditions de la modalité AUTO avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman. Puis, un test de Wilcoxon pour échantillons appariés est réalisé si le test précédent est significatif. Pour toutes ces variables, la condition DM est comparée aux conditions de la modalité AUTO avec des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Pour tester un éventuel effet d'apprentissage sur les performances à la tâche motrice (nombre de produits correctement fabriqués et nombre d'étapes réussies), les valeurs de la condition DM pour les dix participants débutant par cette condition sont comparées avec celles des dix participants finissant par la condition DM, avec un test U de Mann-Whitney.

Les scores RULA moyens, mais aussi les scores RULA moyens de chaque action du participant et de chaque interaction sont comparés entre les deux bras pour chaque condition et indépendamment de la condition avec des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés. De plus, les scores RULA pendant les différentes actions du participant sont comparés entre actions (i.e., « Inactivité » vs « Activité directe » vs « Activité indirecte ») avec une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman suivie d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés si le test précédent est significatif. Les scores des six dimensions du NASA-TLX sont comparés entre eux pour chaque condition avec des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés.

Des corrélations sont effectuées pour observer des liens entre les différentes variables. Les corrélations concernent :

- Le nombre de produits correctement fabriqués avec le nombre d'étapes réussies, avec l'erreur absolue à la tâche auditive, avec les scores RULA moyens des deux côtés et avec les taux de temps mort, collaboration et collaboration directe ;
- Le taux d'inactivité du cobot avec les taux d'inactivité et d'activité directe du participant ;
- Le temps médian d'une inactivité du cobot avec les temps médians de l'inactivité et de l'activité directe du participant ;
- Le taux d'activité du participant avec le taux de collaboration et avec les scores RULA moyens des deux côtés ;
- Le taux d'activité directe du participant avec le taux de collaboration directe et avec les scores RULA moyens des deux côtés ;
- Le score global du NASA-TLX pour chaque condition avec chaque dimension.

Pour les corrélations significatives, un codage selon la valeur de r est utilisé pour catégoriser la corrélation : lorsque $r \leq 0,35$ la corrélation est faible ; quand r se situe entre 0,36 et 0,67 la corrélation est modérée ; lorsque r se situe entre 0,68 et 1,00 la corrélation est forte ; quand $r \geq 0,9$ la corrélation est très forte (Taylor, 1990).

Le niveau de significativité α est fixé à 0,05.

6.2 Résultats

6.2.1 Performances aux tâches

Pendant trois minutes, le participant fabrique un maximum de produits en collaboration avec un cobot. Soit c'est le participant qui mène la cadence de production de manière libre (DM) soit c'est le cobot qui mène la cadence à une vitesse imposée (AUTO). Lorsque le cobot mène la cadence, il y a trois cadences différentes : lente avec 3 produits et une étape (AUTO-SLOW), moyenne avec 4 produits (AUTO-MEAN), rapide avec 5 produits (AUTO-FAST). En parallèle, il doit compter le nombre d'occurrences d'une lettre prédéterminée dans une série de lettres d'un enregistrement audio avec un intervalle inter stimulus de deux secondes.

6.2.1.1 La tâche motrice

Le nombre de produits correctement fabriqués diffère entre les trois conditions de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 16,421, p < 0,001$). Ce nombre est le plus faible dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ avec AUTO-MEAN ; $p < 0,05$ avec AUTO-FAST) tandis qu'aucune différence n'est observée entre les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST. Le nombre de produits correctement fabriqués en condition DM est similaire à ceux des conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST tandis qu'il est plus important qu'en condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). Concernant le nombre d'étapes réussies, celui-ci dépend de la cadence imposée ($\chi^2 (2) = 36,4, p < 0,001$) avec un maximum pour la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ avec AUTO-SLOW ; $p < 0,01$ avec AUTO-MEAN) et un minimum pour la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$ avec AUTO-MEAN). Ce nombre d'étapes réussies en condition DM est supérieur à ceux en condition AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,001$ pour les deux) et est inférieur à celui en condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Le nombre de produits fabriqués ainsi que le nombre d'étapes réussies sont présentés dans la Figure 39.

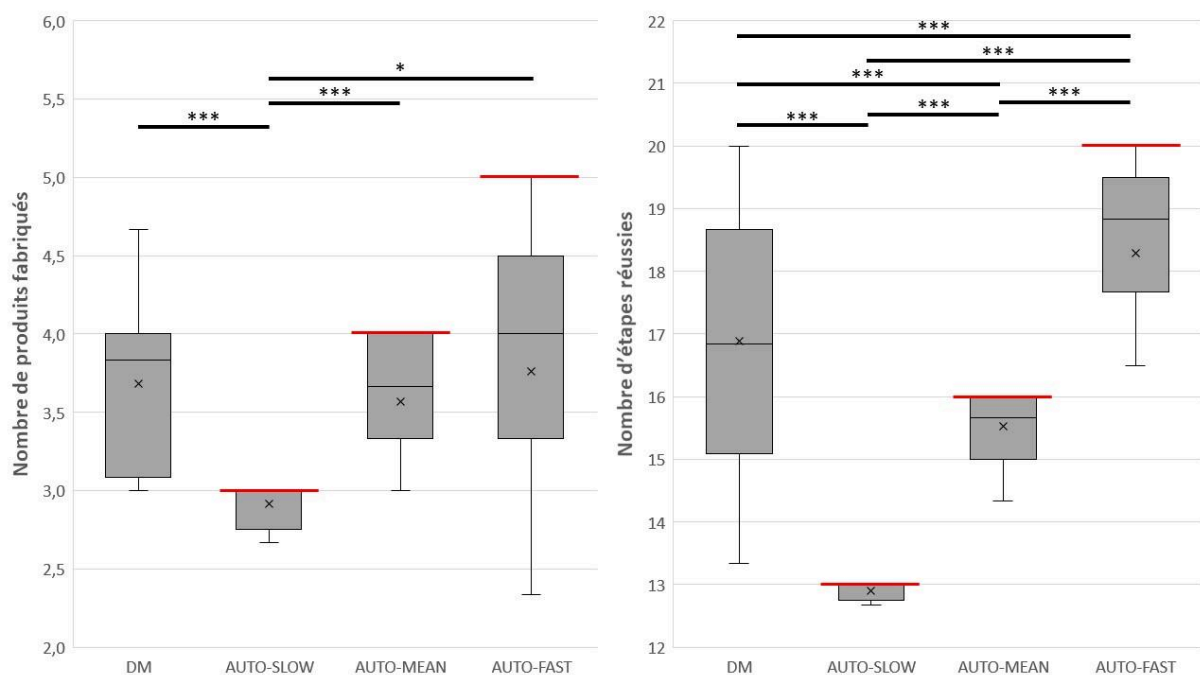


Figure 39 : Nombre de produits fabriqués et nombre d'étapes réussies en trois minutes. Les traits rouges correspondent aux nombres de produits attendus et étapes à effectuer. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$.

Le pourcentage de produits correctement fabriqués, pour les conditions AUTO, diffère selon la cadence imposée ($\chi^2 (2) = 17,676, p < 0,001$) avec un meilleur taux pour la condition SLOW ($p < 0,01$ avec AUTO-MEAN ; $p < 0,001$ avec AUTO-FAST) suivie de la condition AUTO-

MEAN ($p < 0,05$ avec AUTO-FAST). L'ordre est similaire pour le pourcentage de nombre d'étapes réussies ($p < 0,01$ entre AUTO-SLOW et AUTO-MEAN et entre AUTO-MEAN et AUTO-FAST ; $p < 0,001$ entre SLOW et AUTO-FAST). Ces pourcentages sont présentés dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Pourcentage de produits fabriqués par rapport au nombre de produits attendus et pourcentage d'étapes réussies par rapport au nombre d'étapes attendues. ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions.

	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Pourcentage de produits fabriqués (en %)	97,2 ‡	88,8 §	75,6 #
Pourcentage d'étapes réussies (en %)	99,2 ‡	97,0 §	91,7 #

Le nombre de produits fabriqués ainsi que le nombre d'étapes réussies sont plus importants en condition DM pour les participants ayant terminés par cette condition que pour ceux ayant débuté par celle-ci (produits : débuté = 3,2 (0,7) et terminé = 4,0 (0,0) ; étapes : débuté = 15,2 (2,3) et terminé = 18,7 (2,0) ; $p < 0,01$ pour les deux variables).

6.2.1.2 La tâche auditive

Concernant l'erreur absolue, celle-ci diffère entre les conditions de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 13,273$, $p < 0,01$) avec les valeurs les moins importantes pour la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$ avec AUTO-MEAN ; $p < 0,05$ avec AUTO-FAST) tandis qu'aucune différence n'est observée entre les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST. Les résultats de la condition DM sont similaires à ceux des conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN tandis qu'ils sont inférieurs à ceux en AUTO-FAST ($p < 0,05$). Les résultats à la tâche auditive sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Performances à la tâche auditive. Les résultats de l'erreur absolue sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques ne représentent aucune différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

	DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Taux de réussite (en %)	15,0	20,3	13,8	12,3
Erreur absolue	2,3 (2,0)	2,7 ‡ (3,1)	3,7 § (3,0)	3,7 §, * (4,1)

6.2.2 La fluidité dans les tâches

Les actions du co-travailleur cobot et du participant sont codées selon la dichotomie « Inactivité » et « Activité ». L'activité du participant est décomposée en « Activité directe » et en « Activité indirecte ».

Lorsque le co-travailleur et le participant sont en « Inactivité », l'interaction entre les deux est un « Temps mort ». Lorsque l'un est en « Activité » tandis que l'autre est en « Inactivité », il s'agit d'une « Coopération ». Lorsque les deux sont en « Activité », il s'agit d'une « Collaboration », et lorsque le participant est en « Activité directe » il s'agit d'une « Collaboration directe ».

6.2.2.1 Les actions du cobot

Les taux d'inactivité et d'activité du cobot diffèrent selon la condition dans la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 40, p < 0,001$), avec les taux d'inactivité les plus importants en AUTO-SLOW, suivi d'AUTO-MEAN et enfin d'AUTO-FAST, et inversement pour les taux d'activité ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Dans la condition DM, le taux d'inactivité est plus important qu'en condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$) et moins important que dans les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons), tandis que les résultats sont inversés pour le taux d'activité. Les taux d'inactivité du cobot sont présentés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : Actions du cobot. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou #: Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

	DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Taux d'inactivité (en %)	64,4 (6,2)	68,1 ‡,* (1,2)	59,5 §,* (1,3)	53,6 #,* (2,4)
Temps médian d'une inactivité (en s)	6,4 (1,9)	10,0 ‡,* (0,5)	6,1 § (0,3)	4,5 #,* (0,3)

Le temps médian de ses inactivités dépend de la condition dans la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 40$, $p < 0,001$) avec des temps supérieurs en condition AUTO-SLOW par rapport aux conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons) suivis de la condition AUTO-MEAN ($p < 0,001$ avec AUTO-FAST). Le temps médian d'une inactivité du cobot dans la condition DM semble similaire à celui en condition AUTO-MEAN tandis qu'il est inférieur à celui en condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et supérieur à celui en condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Les temps médians d'une inactivité du cobot sont présentés dans le Tableau 14.

6.2.2.2 Les actions du participant

Les taux d'inactivité et d'activité du participant diffèrent selon la condition dans la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 34,3$, $p < 0,001$), avec les taux d'inactivité les plus importants en AUTO-SLOW, suivis d'AUTO-MEAN et enfin d'AUTO-FAST et inversement pour les taux d'activité ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Dans la condition DM, le taux d'inactivité est moins important que dans les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons) et plus important que dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,01$), tandis que les résultats sont inversés pour le taux d'activité. Les taux d'inactivité du participant sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Actions du participant. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

	DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Taux d'inactivité (en %)	29,5 (7,7)	45,9 ‡ * (8,3)	35,8 § * (7,8)	29,5 # * (8,3)
Taux d'activité directe (en %)	37,6 (4,0)	30,8 ‡ * (6,7)	36,8 § * (4,8)	41,0 # * (4,8)
Taux d'activité indirecte (en %)	32,3 (5,6)	24,0 ‡ * (4,5)	28,2 § * (4,9)	31,9 # (7,9)
Temps médian d'une inactivité (en s)	3,1 (1,0)	5,7 ‡ * (1,1)	3,6 § * (0,7)	2,6 # * (0,5)
Temps médian d'une activité directe (en s)	3,9 (1,2)	4,8 ‡ * (1,1)	4,0 § (0,7)	3,5 # * (0,4)
Temps médian d'une activité indirecte (en s)	3,0 (0,4)	2,7 ‡ (0,7)	2,5 § * (0,4)	2,5 ‡ § * (1,0)

Le temps médian de ses inactivités dépend de la condition dans la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 40$, $p < 0,001$) avec des temps supérieurs en condition AUTO-SLOW par rapport aux conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons) suivis de la condition AUTO-MEAN ($p < 0,001$ avec AUTO-FAST). Le temps médian d'une inactivité du participant dans la condition DM est inférieur à ceux dans les conditions AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et AUTO-MEAN ($p < 0,01$) et supérieur à celui en condition AUTO-FAST ($p < 0,01$). Les temps médians d'une inactivité du participant sont présentés dans le Tableau 15.

Les taux d'activité directe et d'activité indirecte diffèrent selon la condition dans la modalité AUTO ($p < 0,001$ pour les deux taux) avec les taux les moins importants dans la condition AUTO-SLOW et les plus importants dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Concernant la condition DM, le taux d'activité directe en condition DM est similaire à celui en condition AUTO-MEAN ($p = 0,55$), supérieur à celui en condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et inférieur à celui en condition AUTO-FAST ($p < 0,05$). Par ailleurs, le taux d'activité indirecte en condition DM est similaire à celui en condition AUTO-FAST ($p = 0,455$) et supérieur à ceux dans les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,001$ pour les deux comparaisons). Les taux d'activités directe et indirecte du participant sont présentés dans le Tableau 15.

Les temps médians des activités directe et indirecte diffèrent selon la condition de la modalité AUTO (respectivement $p < 0,001$ et $p < 0,05$). Le temps médian d'une activité directe est le

moins important dans la condition AUTO-FAST et le plus important dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Par ailleurs, le temps médian d'une activité indirecte est plus important dans la condition AUTO-SLOW que dans la condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$) sans autre différence significative. Pour la condition DM, le temps médian d'une activité directe est similaire à celle en condition AUTO-MEAN ($p = 0,55$), inférieur à celui en condition AUTO-SLOW ($p < 0,05$) et supérieur à celui en condition AUTO-FAST ($p < 0,05$). Pour le temps médian d'une activité indirecte du participant, les résultats de la condition DM sont similaires à ceux de la condition AUTO-SLOW ($p = 0,313$) et supérieurs à ceux dans les conditions AUTO-MEAN ($p < 0,01$) et AUTO-FAST ($p < 0,05$). Les temps médians d'une activité directe et d'une activité indirecte du participant sont présentés dans le Tableau 15.

6.2.2.3 Les interactions entre les deux travailleurs

Le taux de temps morts diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 36,4$, $p < 0,001$) avec un taux plus important dans la condition AUTO-SLOW, suivi de la condition AUTO-MEAN et enfin de la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Concernant la condition DM, ce taux est similaire à celui de la condition AUTO-MEAN ($p = 0,455$), inférieur à celui de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et supérieur à la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Les taux de temps morts sont présentés dans la Figure 40.

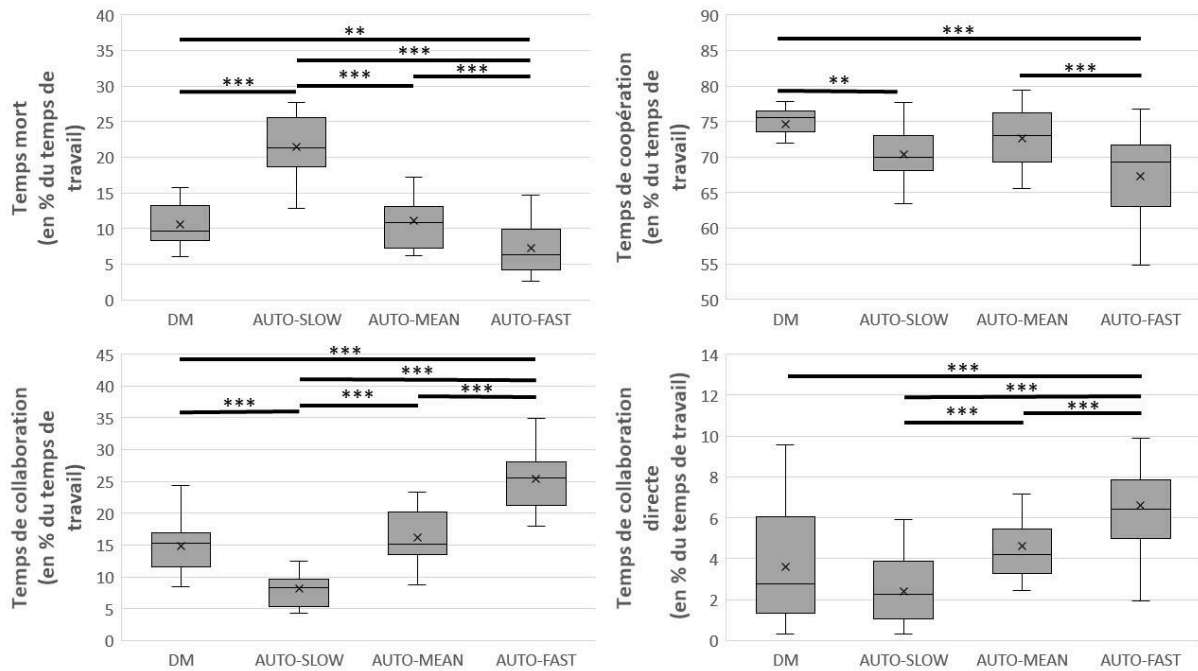


Figure 40 : Taux d'interactions entre le participant et le cobot en trois minutes. ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Le taux de coopération ne diffère pas selon la condition de la modalité AUTO ($p = 0,058$). Concernant le taux de coopération en condition DM, il est plus important que dans les conditions AUTO-SLOW ($p < 0,01$) et AUTO-FAST ($p < 0,001$). Les taux de coopération sont présentés dans la Figure 40.

Le taux de collaboration diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 40$, $p < 0,001$) avec le taux le plus important dans la condition AUTO-FAST, suivi de la condition AUTO-MEAN et enfin de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Concernant la condition DM, ce taux est similaire à celui de la condition AUTO-MEAN ($p = 0,279$), supérieur à celui de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et inférieur à la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Les taux de collaboration sont présentés dans la Figure 40.

Le taux de collaboration directe diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 33,6$, $p < 0,001$). Ce taux est le plus important dans la condition AUTO-FAST, suivi de la condition AUTO-MEAN et enfin de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour toutes les comparaisons). Le taux de collaboration directe est moins important pour la condition DM que pour la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$) sans autre différence observée. Les taux de collaboration directe sont présentés dans la Figure 40.

6.2.3 La posture du participant

A partir des données cinématiques de la motion capture, une évaluation RULA est effectuée en continu pendant un essai. Ce score est compris entre 1 et 7. Plus il est important, plus la posture est à risques de développer des TMS. Ces scores RULA sont moyennés pour l'ensemble d'un essai, mais aussi pendant les différentes actions du participant (i.e., « Inactivité », « Activité directe » et « Activité indirecte »).

Lors des étapes de l'évaluation RULA, des scores sont données pour chaque articulation. Également à partir des données cinématiques de la motion capture, les angles moyens des articulations des membres supérieurs, du tronc et de la nuque sont calculés pour l'ensemble d'un essai, mais aussi pendant les différentes actions du participant.

6.2.3.1 Pendant l'ensemble d'un essai

6.2.3.1.1 Les scores RULA moyens du participant

Le score RULA diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 7,5$, $p < 0,05$ pour les deux côtés) pour le côté gauche et le côté droit. Les scores de la condition AUTO-FAST sont supérieurs à ceux en condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$ pour les deux côtés), sans autre différence observée. Les scores RULA de la condition DM sont similaires à ceux des conditions de la modalité AUTO pour les deux côtés. Les scores RULA des deux côtés sont présentés dans la Figure 41.

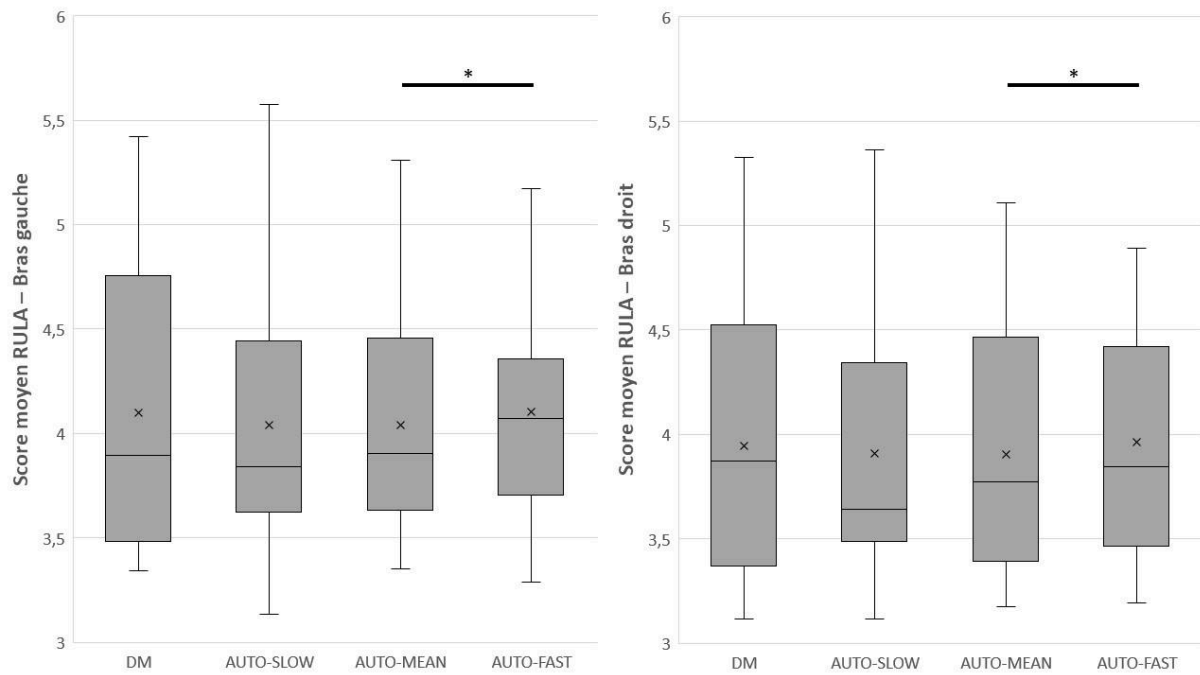


Figure 41 : Scores RULA pour le côté gauche et pour le côté droit. * $p < 0,05$.

Pour les deux côtés, en condition DM, les scores RULA moyens ne diffèrent pas entre les participants ayant débutés par cette condition et ceux ayant terminés par celle-ci.

6.2.3.1.2 Les temps pour les scores RULA

Puisque la somme des scores r1, r2 et r7 est en moyenne inférieure à 2% et que la majorité des temps pour ces scores est égale à 0%, seuls les temps des scores r3, r4, r5 et r6 sont décrits et présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Temps passé pour les scores RULA pour les deux côtés (en %). r3, r4, r5 et r6 correspondent respectivement aux scores 3, 4, 5 et 6 lors de l'évaluation RULA. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡ ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

		DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
r3	Gauche	41,2 (30,3)	43,7 (26,9)	41,8 (34,7)	31,5 (19,3)
	Droite	44,4 (45,0)	52,1 (42,8)	44,6 (48,4)	37,8 (41,7)
r4	Gauche	29,0 (9,3)	30,6 (11,3)	30,8 (15,3)	34,7 (17,6)
	Droite	29,0 (13,7)	26,4 ‡ (19,9)	24,1 ‡ (23,8)	33,4 § * (17,6)
r5	Gauche	17,6 (9,7)	12,3 (11,9)	12,9 (9,8)	16,5 (14,0)
	Droite	8,0 (11,9)	8,3 (13,1)	7,9 (9,2)	10,3 (11,3)
r6	Gauche	5,7 (21,2)	7,8 ‡ (8,5)	5,3 § (7,3)	7,3 ‡ (10,7)
	Droite	6,3 (11,4)	8,2 (7,5)	4,1 * (6,6)	3,0 (12,7)

Pour le côté gauche et pour le côté droit, les temps dans les scores r3 et r5 ne semblent pas différer selon la condition. Pour le score r4, le temps ne diffère pas pour le côté gauche tandis que ce temps diffère selon la condition pour le côté droit ($p < 0,05$) avec des temps plus importants dans la condition AUTO-FAST que dans les trois autres conditions de l'étude ($p < 0,05$ pour les trois comparaisons). Pour le score r6, le temps ne diffère pas pour le côté droit entre les conditions de la modalité AUTO ($p = 0,449$) tandis que ce temps diffère selon la condition pour le côté gauche ($p < 0,05$) avec des temps plus importants dans la condition AUTO-FAST que dans les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,05$ pour les deux comparaisons) sans différence entre AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p = 0,823$). Les temps pour le score r6 de la condition DM ne sont pas différents de ceux des conditions de la modalité AUTO pour les deux côtés, excepté pour le côté droit avec un temps plus important que dans la condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$).

6.2.3.1.3 Les contraintes pour chaque articulation : scores RULA

Lors de l'évaluation RULA, une des tables indique un score à partir des articulations de la nuque et du dos. Celui-ci est identique pour l'évaluation RULA des deux côtés. Les valeurs des scores RULA pour la nuque et le dos sont présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17 : Scores RULA pour les articulations mesurées dans l'évaluation RULA. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). †, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

		DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Nuque		2,1 (1,1)	1,9 (0,5)	1,9 (0,7)	1,8 (0,6)
Dos		2,4 (0,5)	2,3 † (0,8)	2,5 § (0,8)	2,7 #,* (0,6)
Épaules	Gauche	2,5 (0,3)	2,4 †,* (0,1)	2,5 § (0,2)	2,6 #,* (0,2)
	Droit	2,4 (0,2)	2,3 (0,2)	2,3 (0,2)	2,4 * (0,3)
Coudes	Gauche	2,5 (0,4)	2,4 (0,4)	2,4 (0,4)	2,3 * (0,5)
	Droit	1,9 (0,5)	1,9 (0,3)	1,8 (0,4)	1,8 (0,4)
Poignets	Gauche	2,5 (0,3)	2,6 (0,3)	2,5 (0,3)	2,5 (0,4)
	Droit	2,6 (0,2)	2,6 (0,2)	2,6 (0,3)	2,6 (0,3)

Le score pour la nuque est similaire entre les quatre conditions. Cependant, le score pour le dos diffère selon les conditions de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 15,7$, $p < 0,001$). Le score dans la condition AUTO-FAST est le plus important ($p < 0,01$ avec SLOW et MEAN) suivi de la condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$ avec AUTO-SLOW). Ce score est plus important dans la condition AUTO-FAST que dans la condition DM ($p < 0,01$) sans autre différence.

Pour chaque côté, une des tables indique un score pour le membre supérieur à partir des articulations de l'épaule, du coude et du poignet. Les valeurs des scores RULA pour les épaules, les coudes et les poignets sont présentées dans le Tableau 17.

Pour l'épaule droite, le coude droit et le poignet droit, les scores ne diffèrent pas selon la condition de la modalité AUTO. Par ailleurs, le score est plus important pour l'épaule droite dans la condition AUTO-FAST que dans la condition DM ($p < 0,05$) bien qu'il n'existe aucune différence ni pour le coude droit ni pour le poignet droit entre la condition DM et les conditions de la modalité AUTO.

Le score pour l'épaule gauche diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 15,7$, $p < 0,001$) avec le score le plus important pour la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ avec AUTO-SLOW et $p < 0,01$ avec AUTO-MEAN) suivi de la condition AUTO-MEAN ($p < 0,01$ avec AUTO-SLOW). Le score pour la condition DM est similaire à celui de la condition AUTO-MEAN ($p = 0,737$), supérieur à celui de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,05$) et inférieur à celui de la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$). Concernant le coude gauche et le poignet gauche, les scores ne diffèrent pas selon la condition de la modalité AUTO. Par ailleurs, le score du

coude gauche pour la condition DM est supérieur à celui pour la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$). Aucune autre différence n'est observée avec la condition DM.

6.2.3.1.4 Les contraintes pour chaque articulation : position angulaire

Les positions moyennes des articulations des membres supérieurs, du dos et de la nuque sont calculées pour l'ensemble d'un essai. Ainsi, les abductions des deux épaules et les flexions des épaules, des coudes, des poignets, du dos et de la nuque sont mesurées. Pour rappel, les postures optimales définies par NIOSH sont : 0° de flexion/extension et d'abduction/adduction d'épaule, 90° de flexion de coude, 0° de flexion de poignet, de nuque et de dos (Moore et al., 2011). Les positions moyennes des articulations sont présentées dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Position angulaire des articulations des membres supérieurs, de la nuque et du dos. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). † ou § : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l'absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

		DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Épaules (abd°)	Gauche	14,6 (4,8)	12,9 † * (5,6)	16,1 § (5,1)	15,9 § (11,0)
	Droit	18,9 (5,9)	17,0 † (3,3)	19,1 § (4,0)	19,4 § (7,5)
Épaules (flex°)	Gauche	18,0 (14,9)	16,5 † * (10,4)	16,6 † * (8,3)	19,1 § (9,1)
	Droit	12,8 (9,4)	15,5 (7,3)	11,9 (9,9)	12,3 (8,8)
Coudes	Gauche	65,3 (17,9)	64,5 † (20,4)	67,2 § (25,6)	72,0 § * (23,4)
	Droit	72,2 (16,2)	70,3 † (28,3)	74,1 § (20,0)	71,1 § (18,8)
Poignets	Gauche	-23,1 (7,6)	-25,1 (11,0)	-23,5 (10,8)	-22,1 (11,1)
	Droit	-24,9 (6,6)	-23,8 (7,1)	-22,4 * (7,1)	-23,5 * (7,3)
Nuque		6,2 (5,3)	5,6 † (3,6)	7,0 § (4,2)	7,4 § (3,4)
Dos		5,3 (11,5)	5,4 † (11,5)	9,5 § (16,2)	10,7 § * (11,2)

Les valeurs de l'abduction moyenne des épaules gauche et droite diffèrent selon les conditions de la modalité AUTO (gauche : $\chi^2(2) = 7,9$, $p < 0,05$; droite : $\chi^2(2) = 19,9$, $p < 0,001$), avec des valeurs inférieures dans la condition AUTO-SLOW pour les deux épaules ($p < 0,01$ pour les quatre comparaisons). L'abduction moyenne est plus importante dans la condition AUTO-FAST que dans la condition AUTO-MEAN pour l'épaule droite ($p < 0,05$) mais aucune différence n'est observée pour l'épaule gauche ($p = 0,204$). L'abduction moyenne dans la condition DM ne diffère avec aucune condition des modalités AUTO, tandis que pour l'épaule gauche, cette abduction moyenne est seulement plus importante pour DM que pour AUTO-SLOW ($p < 0,05$).

Les valeurs de la flexion moyenne de l'épaule droite ne diffèrent pas selon la condition AUTO ($\chi^2 (2) = 1,2, p = 0,549$), et aucune différence n'est observée entre la condition DM et les conditions de la modalité AUTO. En revanche, ces valeurs pour les conditions de la modalité AUTO diffèrent pour l'épaule gauche ($\chi^2 (2) = 13,9, p < 0,001$). La flexion moyenne est plus importante dans la condition AUTO-FAST que dans les deux autres conditions ($p < 0,001$ avec AUTO-MEAN et $p < 0,01$ avec AUTO-SLOW). La flexion moyenne n'est pas différente entre les conditions DM et AUTO-FAST ($p = 0,135$), mais est plus importante que dans les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,01$ pour les deux comparaisons).

La flexion moyenne des deux coudes diffère selon la condition de la modalité AUTO (gauche : $\chi^2 (2) = 13,9, p < 0,001$; droite : $\chi^2 (2) = 13,3, p < 0,001$). La flexion est la moins importante dans la condition AUTO-SLOW pour les deux coudes ($p < 0,01$ pour les quatre comparaisons), sans différence entre AUTO-MEAN et AUTO-FAST pour les deux côtés. Concernant la valeur dans la condition DM, celle-ci est moins importante que dans la condition AUTO-FAST pour le coude gauche ($p < 0,05$), mais aucune autre différence n'est observée pour les deux côtés.

La flexion moyenne des deux poignets ne diffère pas selon les conditions de la modalité AUTO (gauche : $\chi^2 (2) = 2,8, p = 0,247$; droite : $\chi^2 (2) = 3,7, p = 0,157$). Pour le poignet droit, la flexion moyenne dans la condition DM est inférieure à celles des conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,05$ pour les deux comparaisons). En revanche, pour le poignet gauche, la flexion moyenne dans la condition DM n'est pas différente de celles des conditions de la modalité AUTO.

Les valeurs de la flexion moyenne diffèrent pour la nuque ($\chi^2 (2) = 13,3, p < 0,01$). La flexion moyenne est la moins importante dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$ avec AUTO-MEAN et AUTO-FAST) sans différence entre AUTO-MEAN et AUTO-FAST. La flexion moyenne en condition DM ne diffère pas de celles des conditions de la modalité AUTO.

Les valeurs de la flexion moyenne diffèrent pour le dos ($\chi^2 (2) = 11,1, p < 0,01$). La flexion moyenne est la moins importante dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$ avec AUTO-FAST et $p < 0,05$ avec AUTO-MEAN) sans différence entre les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p = 0,067$). La flexion moyenne en condition DM ne diffère pas de celles dans les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN mais est moins importante que dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$).

6.2.3.2 Pendant les actions du participant

6.2.3.2.1 Les scores RULA pendant les actions du participant

Un score RULA moyen est calculé pour chaque action du participant (i.e., « Inactivité », « Activité directe » et « Activité indirecte ») pour les deux côtés.

Lorsque le participant est inactif, aucune différence n'est observée entre les différentes conditions pour les deux côtés. Les résultats sont similaires lorsque le participant est en « Activité indirecte ». Lors des activités directes du participant, aucune différence n'est observée entre les conditions de la modalité AUTO pour les deux côtés. De plus, aucune différence entre la condition DM et les conditions de la modalité AUTO n'est observée. Les valeurs des scores RULA pour les différentes actions du participant pour les deux côtés sont présentées dans la Figure 42.

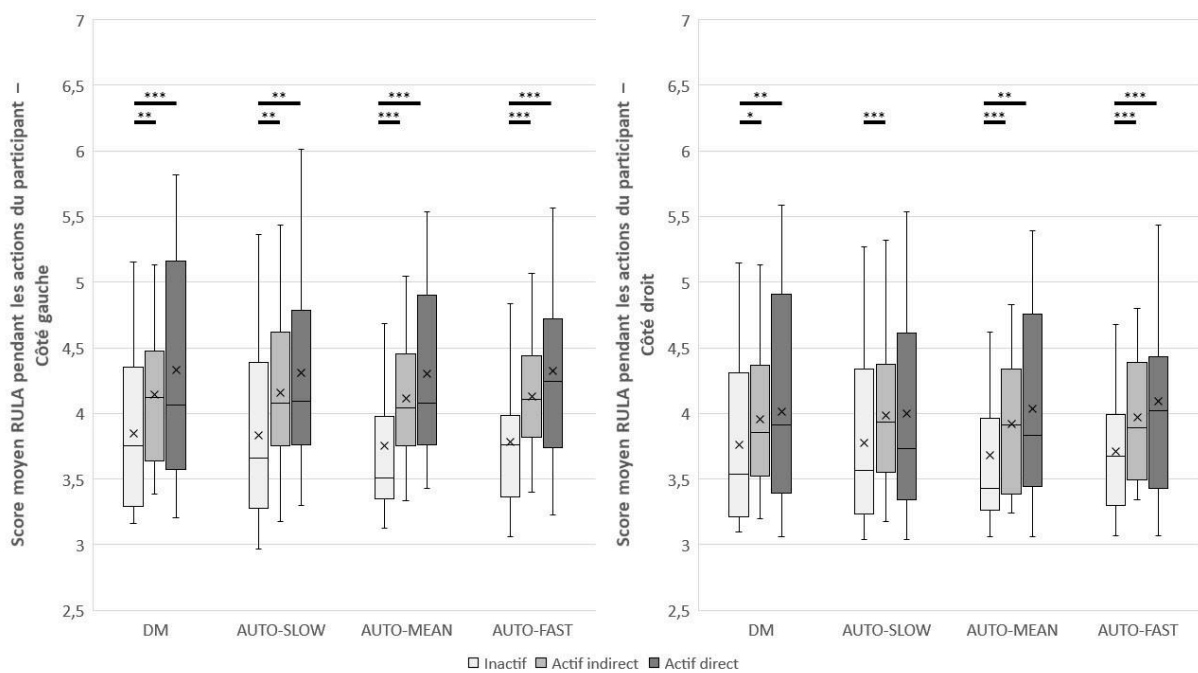


Figure 42 : Scores moyens RULA pendant les actions du participant pour les deux côtés. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

6.2.3.2.2 Comparaison des scores RULA lors des actions du participant

En comparant les scores RULA pendant les différentes actions du participant, pour les quatre conditions et les deux côtés, nous constatons que le score RULA est inférieur lorsque le

participant est inactif comparativement aux moments où il est en activité directe (côté gauche : $p < 0,01$ pour AUTO-SLOW et $p < 0,001$ pour DM, AUTO-MEAN et AUTO-FAST ; côté droit : $p < 0,01$ pour DM et AUTO-MEAN, $p < 0,001$ pour AUTO-FAST) et en activité indirecte (côté gauche : $p < 0,01$ pour DM et AUTO-SLOW et $p < 0,001$ pour AUTO-MEAN et AUTO-FAST ; côté droit : $p < 0,05$ pour DM et $p < 0,001$ pour AUTO-SLOW, AUTO-MEAN et AUTO-FAST). Aucune différence n'est observée entre les scores aux activités directe et indirecte pour les deux côtés. Ces différences significatives sont présentées dans la Figure 42.

6.2.3.3 Comparaison entre les deux côtés

Pour les scores RULA, les deux côtés sont comparés sur l'ensemble de l'essai, mais aussi lors des différentes actions du participant.

Pendant tout l'essai, le score du côté gauche est plus important que celui du côté droit quelle que soit la condition ($p < 0,01$ pour les quatre comparaisons). Les scores du côté gauche sont également plus importants que pour le côté droit, pour toutes les actions du participant quelle que soit la condition (« Inactivité » : $p < 0,05$ pour AUTO-SLOW, $p < 0,01$ pour AUTO-MEAN et AUTO-FAST, $p < 0,001$ pour DM ; « Activité directe » : $p < 0,01$ pour AUTO-FAST, $p < 0,001$ pour DM, AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ; « Activité indirecte » : $p < 0,01$ pour AUTO-SLOW et AUTO-FAST, $p < 0,001$ pour DM et AUTO-MEAN). Les scores RULA pendant les différentes activités du participant sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Comparaison entre les scores RULA des deux côtés lors des actions du participant selon la condition. * différence significative entre le côté gauche et le côté droit.

	DM		AUTO-SLOW		AUTO-MEAN		AUTO-FAST	
	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
Global	3,90 * (1,11)	3,87 (1,07)	3,84 * (0,80)	3,64 (0,72)	3,90 * (0,71)	3,77 (0,90)	4,07 * (0,58)	3,85 (0,72)
Inactivité	3,75 * (0,93)	3,53 (0,96)	3,66 * (0,94)	3,57 (0,98)	3,51 * (0,58)	3,43 (0,64)	3,76 * (0,56)	3,68 (0,68)
Activité Directe	4,06 * (1,35)	3,92 (1,43)	4,10 * (1,35)	3,73 (1,11)	4,08 * (0,96)	3,83 (1,17)	4,24 * (0,88)	4,02 (0,91)
Activité Indirecte	4,12 * (0,68)	3,85 (0,75)	4,08 * (0,85)	3,93 (0,81)	4,04 * (0,58)	3,91 (0,81)	4,10 * (0,55)	3,89 (0,77)

6.2.4 Le stress : la fréquence cardiaque (FC)

La FC est moyennée pendant les trois minutes de l'essai. Celle-ci ne diffère pas selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 0,947, p = 0,623$) et les valeurs sont similaires à celle de la condition DM. Ces valeurs sont présentées dans le Tableau 20.

Tableau 20 : FC moyenne (en bpm) pendant trois minutes.

	DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
FC (en bpm)	86,7 (19,6)	89,2 (16,1)	89,2 (16,3)	89,9 (14,2)

6.2.5 La charge cognitive

Pour rappel, le score du NASA-TLX est compris entre 0 et 100 ; plus ce score est élevé plus la charge cognitive subjective est élevée.

6.2.5.1 Le score global

Ce score diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2 (2) = 18,9, p < 0,001$). Celui-ci est le plus important dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ avec AUTO-SLOW et AUTO-MEAN) suivi de celui dans la condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$ avec SLOW). Le score dans la condition DM est similaire à celui dans la condition AUTO-MEAN ($p = 0,37$), supérieur à celui dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$) et inférieur à celui dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$). Les scores du NASA-TLX sont présentés dans la Figure 43.

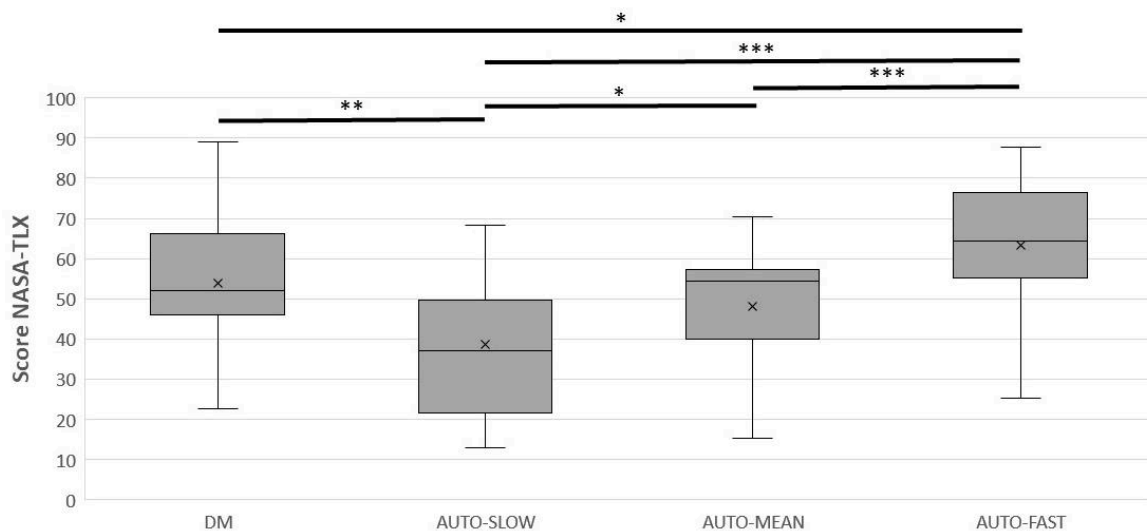


Figure 43 : Score du NASA-TLX pour les quatre conditions. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

6.2.5.2 Les scores pour chaque dimension

Le NASA-TLX est composée de six dimensions. Pour chacune d’entre elles, la valeur de l’échelle de Likert (entre 0 et 100) et le score (entre 0 et 33,3) sont comparés. Les valeurs et scores pour chaque dimension du NASA-TLX sont présentés dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Valeurs et scores des six dimensions du NASA-TLX. Les résultats sont présentés en médiane (écart interquartile). ‡, § ou # : Pour les trois conditions de la modalité AUTO sur une ligne, des symboles identiques représentent l’absence de différence significative entre les conditions, tandis que des symboles différents représentent une différence significative entre les conditions. Aucun symbole pour les trois conditions de la modalité AUTO signifie aucune différence significative entre ces trois conditions. * représente une différence significative entre la condition DM et la condition AUTO avec le symbole.

		DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Exigence mentale	Valeur	70,0 (27,5)	45,0 (36,3) ‡, *	55,0 (41,3) §	72,5 (15,0) #
	Score	17,2 (13,8)	10,2 (11,7) ‡, *	10,0 (7,6) ‡	17,2 (8,8) §
Exigence physique	Valeur	25,0 (27,5)	25,0 (16,3) ‡	42,5 (31,3) §	40,0 (37,5) §
	Score	2,0 (5,5)	0,0 (3,0)	0,0 (3,4)	2,3 (5,1)
Exigence temporelle	Valeur	32,5 (41,3)	17,5 (25,0) ‡	52,5 (42,5) §	80,0 (21,3) #, *
	Score	1,2 (7,5)	1,2 (3,7) ‡	8,7 (13,1) §	22,0 (19,0) #, *
Effort	Valeur	55,0 (17,5)	35,0 (30,0) ‡, *	52,5 (27,5) §	70,0 (16,3) #, *
	Score	10,8 (7,2)	3,5 (5,6) ‡, *	9,7 (8,0) §	11,7 (10,2) #
Performance	Valeur	42,5 (22,5)	27,5 (18,8)	32,5 (27,5)	32,5 (21,3)
	Score	5,2 (6,2)	5,2 (3,1)	5,2 (3,5)	5,0 (4,8)
Frustration	Valeur	50,0 (45,0)	42,5 (40,0)	45,0 (28,8)	60,0 (30,0)
	Score	5,3 (14,6)	8,7 (14,8)	7,3 (8,7)	4,2 (8,7)

6.2.5.2.1 Exigence mentale

La valeur indiquée ainsi que le score de l'exigence mentale dépendent de la condition de la modalité AUTO (respectivement $p < 0,001$ et $p < 0,05$). La valeur et le score sont les plus importants dans la condition AUTO-FAST (valeur indiquée : $p < 0,001$ avec AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ; score : $p < 0,01$ avec AUTO-SLOW et AUTO-MEAN). La valeur dans la condition AUTO-MEAN est supérieure à celle en condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$) mais le score est similaire entre les conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p = 0,411$).

La valeur indiquée et le score dans la condition DM sont similaires à ceux dans la condition AUTO-MEAN et sont supérieurs à ceux en condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour la valeur et $p < 0,05$ pour le score). Aucune différence n'est observée entre DM et AUTO-FAST ni pour la valeur ($p = 0,055$) ni pour le score ($p = 0,433$).

6.2.5.2.2 Exigence physique

La valeur indiquée à l'exigence physique diffère selon la condition de la modalité AUTO ($\chi^2(2) = 10,182$, $p < 0,01$) tandis que ce n'est pas le cas pour le score à cette dimension ($p = 0,149$). La valeur indiquée est la plus faible dans la condition AUTO-SLOW par rapport aux conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,01$ pour les deux comparaisons) sans différence entre ces deux dernières.

Ni la valeur indiquée ni le score à l'exigence physique dans la condition DM ne diffèrent d'une des conditions de la modalité AUTO.

6.2.5.2.3 Exigence temporelle

La valeur indiquée et le score à l'exigence temporelle diffèrent selon la condition de la modalité AUTO ($p < 0,001$ pour les deux variables) avec des valeurs et des scores les plus importants dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,01$ avec AUTO-MEAN pour le score et $p < 0,001$ pour les autres comparaisons) suivis des valeurs et des scores dans la condition AUTO-MEAN ($p < 0,01$ avec AUTO-SLOW pour le score et $p < 0,001$ avec AUTO-SLOW pour la valeur).

La valeur indiquée ainsi que le score dans la condition DM sont similaires à ceux des conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN et sont inférieurs à ceux dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ pour les deux variables).

6.2.5.2.4 Effort

La valeur indiquée et le score à l'effort diffèrent selon la condition de la modalité AUTO ($p < 0,001$ pour les deux variables) avec des valeurs et des scores les plus importants dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$ avec AUTO-SLOW pour la valeur et $p < 0,01$ pour les autres comparaisons) suivis des valeurs et des scores dans la condition AUTO-MEAN ($p < 0,01$ avec AUTO-SLOW pour le score et $p < 0,001$ avec AUTO-SLOW pour la valeur).

La valeur et le score à l'effort dans la condition DM sont supérieurs à ceux dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour la valeur et $p < 0,01$ pour le score) et la valeur est inférieure à celle en condition AUTO-FAST ($p < 0,05$) contrairement au score ($p = 0,601$). Cependant aucune différence n'est observée entre les conditions DM et AUTO-MEAN.

6.2.5.2.5 Performance

Aucune différence n'est observée pour la valeur indiquée et pour le score de la performance entre les différentes conditions.

6.2.5.2.6 Frustration

Aucune différence n'est observée pour la valeur indiquée et pour le score de la frustration entre les différentes conditions.

6.2.5.3 Comparaison des dimensions pour chaque condition

Pour chaque condition, les six dimensions sont comparées entre elles.

6.2.5.3.1 Condition DM

Dans cette condition, l'exigence mentale est la dimension la plus importante des six ($p < 0,05$ avec la frustration ; $p < 0,01$ avec l'exigence temporelle ; $p < 0,001$ avec l'exigence physique et la performance ; mais pas de différence avec l'effort $p = 0,057$) suivie par l'effort ($p < 0,05$ avec la performance ; $p < 0,001$ avec l'exigence physique ; sans différence avec l'exigence temporelle et la frustration). Les quatre autres dimensions ne sont pas différentes entre elles.

6.2.5.3.2 Condition AUTO-SLOW

En condition AUTO-SLOW, l'exigence mentale est la dimension la plus importante ($p < 0,01$ avec l'exigence temporelle et la performance ; $p < 0,001$ avec l'exigence physique et l'effort) mais n'est pas différente de la frustration ($p = 0,323$). Ensuite, la performance et l'effort sont plus importants que l'exigence physique ($p < 0,01$ pour les deux comparaisons) mais ne sont pas différents entre eux. La performance est plus importante que l'exigence temporelle ($p < 0,01$). La frustration est inférieure à l'exigence physique ($p < 0,01$) et à l'exigence temporelle ($p < 0,01$). Les autres comparaisons ne sont pas significativement différentes.

6.2.5.3.3 Condition AUTO-MEAN

L'exigence mentale et l'exigence temporelle ne sont pas différentes ($p = 0,171$). L'exigence mentale est plus importante que les quatre autres dimensions ($p < 0,05$ avec l'effort et la frustration ; $p < 0,001$ avec l'exigence physique et la performance). L'exigence temporelle est uniquement supérieure à l'exigence physique ($p < 0,01$). De plus, l'exigence physique est inférieure aux trois autres dimensions ($p < 0,05$ avec la performance et la frustration ; $p < 0,01$ avec l'effort). Il n'y a pas de différence significative entre l'effort, la performance et la frustration.

6.2.5.3.4 Condition AUTO-FAST

En condition AUTO-FAST, l'exigence mentale et l'exigence temporelle ne sont pas différentes ($p = 0,881$). De plus, ces deux dimensions sont supérieures aux quatre autres (exigence mentale : $p < 0,05$ avec l'effort, $p < 0,001$ avec l'exigence physique, la performance et la frustration ; exigence temporelle : $p < 0,01$ avec la performance et la frustration, $p < 0,001$ avec l'exigence physique, mais pas de différence significative avec l'effort ($p = 0,083$)). L'effort est plus important que l'exigence physique, la performance et la frustration ($p < 0,01$ pour les trois comparaisons). De plus, aucune différence n'est observée entre les trois dernières dimensions.

6.2.6 Corrélations

Le nombre de produits correctement fabriqués est fortement corrélé au nombre d'étapes réussies ($r = 0,795$, $p < 0,001$). Cependant, aucune variable de performance à la tâche motrice n'est corrélée à l'erreur absolue à la tâche auditive.

Ni le nombre de produits correctement fabriqués ni le nombre d'étapes réussies ne sont corrélés avec les scores RULA moyens des deux côtés.

Le nombre de produits correctement fabriqués est légèrement corrélé avec le taux d'activité du participant ($r = 0,26$, $p < 0,05$) et avec son taux d'activité directe ($r = 0,332$, $p < 0,01$). De plus ce nombre de produits est modérément et négativement corrélé au temps médian d'une activité directe du participant ($r = -0,395$, $p < 0,001$).

Le nombre d'étapes réussies est modérément corrélé avec le taux d'activité du participant ($r = 0,569$, $p < 0,001$) et avec son taux d'activité directe ($r = 0,547$, $p < 0,001$) mais aussi négativement avec le temps médian d'une activité directe du participant ($r = -0,627$, $p < 0,001$).

Le nombre de produits correctement fabriqués est modérément et négativement corrélé avec le taux de temps morts ($r = 0,-453$, $p < 0,001$), légèrement avec le taux de collaboration ($r = 0,227$, $p < 0,05$) et modérément avec le taux de collaboration directe ($r = 0,493$, $p < 0,001$).

Le nombre d'étapes réussies est modérément corrélé avec le taux de collaboration ($r = 0,622$, $p < 0,001$), modérément avec le taux de collaboration directe ($r = 0,657$, $p < 0,001$) et fortement et négativement avec le taux de temps morts ($r = -0,722$, $p < 0,001$).

Le taux d'inactivité du participant est modérément corrélé à celui du cobot ($r = 0,468$, $p < 0,001$). De plus, le temps médian d'une inactivité du participant est fortement corrélé à celui du cobot ($r = 0,786$, $p < 0,001$).

Le taux d'activité directe du participant est modérément et négativement corrélé au taux d'inactivité du cobot ($r = -0,444$, $p < 0,001$). Il est à noter que le temps d'une activité directe du participant est modérément corrélé à l'inactivité du cobot ($r = 0,643$, $p < 0,001$).

Le taux d'activité du participant est fortement corrélé au taux de collaboration ($r = 0,82$, $p < 0,001$). De plus, le taux d'activité directe du participant est modérément corrélé avec le taux de collaboration directe ($r = 0,496$, $p < 0,001$).

Ni le taux d'activité du participant ni son taux d'activité directe ne sont corrélés à des scores RULA moyens des deux côtés. De plus, le temps médian de ses activités directes n'est pas corrélé au score RULA moyen, pour les deux côtés.

L'importance de chaque dimension est mesurée avec des corrélations entre le score à la dimension et le score global de la condition. Le score global de la condition DM est modérément corrélé à l'exigence mentale ($r = 0,593$, $p < 0,01$) et l'est fortement à la frustration ($r = 0,691$, $p < 0,001$). Le score global de la condition AUTO-SLOW est modérément corrélé à l'exigence mentale ($r = 0,687$, $p < 0,001$), à l'effort ($r = 0,64$, $p < 0,01$) et à la frustration ($r = 0,662$, $p < 0,01$). Concernant le score global de la condition AUTO-MEAN, celui-ci est modérément corrélé à l'exigence mentale ($r = 0,451$, $p < 0,05$), à l'exigence temporelle ($r = 0,572$, $p < 0,01$) et à l'effort ($r = 0,529$, $p < 0,01$). Le score global de la condition AUTO-FAST est également modérément corrélé à l'exigence mentale ($r = 0,676$, $p < 0,01$), à l'exigence temporelle ($r = 0,674$, $p < 0,01$) et à l'effort ($r = 0,569$, $p < 0,01$).

6.3 Discussion

Cette étude avait pour objectif d'analyser l'influence de la cadence sur les performances de production et les répercussions sur la santé des opérateurs, dans une tâche collaborative effectuée par un système hybride (humain-cobot). La cadence peut être modifiée selon plusieurs paramètres, dont la vitesse et le meneur. Ainsi, cette étude peut se décomposer en deux sous-objectifs, d'une part étudier l'influence de plusieurs vitesses lorsqu'elle est imposée (i.e., menée

par le cobot dans le système hybride) et d'autre part étudier l'influence du meneur de la cadence (i.e., humain ou cobot) sur les performances de production et sur les répercussions sur la santé des opérateurs. Dans cette étude, les performances de production étaient mesurées par le nombre et le pourcentage de produits fabriqués ; les ressources attentionnelles disponibles de l'opérateur par les performances à une seconde tâche ; la fluidité des interactions à travers les actions des deux travailleurs et la synchronisation de leurs actions ; son stress par sa fréquence cardiaque ; sa charge de travail perçue par le questionnaire NASA-TLX.

Pour répondre au premier objectif de cette étude, la cadence de production a été menée par le cobot, à trois cadences différentes (une cadence par condition). Ces trois cadences ont été considérées comme lente, moyenne et rapide. Cette classification s'est basée sur le nombre de produits fabriqués par les participants dans l'étude précédente comme étant la cadence moyenne, correspondant aux capacités moyennes de l'opérateur. Les deux autres cadences ont été choisies arbitrairement. Pour répondre au deuxième objectif, le participant menait la cadence avec pour but de fabriquer un maximum de produits en trois minutes en interaction avec le cobot.

6.3.1 La production : entre amélioration de celle-ci et diminution de son efficacité

6.3.1.1 Augmenter la cadence imposée : bénéfique pour la production jusqu'à un seuil et dégradation de son efficacité

La cadence de production est un paramètre important à définir pour la productivité du poste de travail. Plus cette cadence est rapide et plus le nombre attendu de produits assemblés est important.

Tout d'abord, malgré une augmentation du nombre d'étapes de fabrication avec celle de la cadence imposée, le nombre de produits correctement fabriqués a augmenté par rapport à la cadence la plus faible, mais celui-ci n'a pas continué d'augmenter avec la cadence imposée la plus rapide. La qualité de fabrication a diminué en raison d'étapes de fabrications manquées, et par conséquent des produits non finis. L'opérateur semble ici ne plus être en mesure de respecter la cadence qui lui est imposée, donnant lieu à une stabilisation de la production malgré une demande de production accrue.

Il a été observé une diminution de l'efficacité de production avec une dégradation du pourcentage de produits fabriqués par rapport aux produits attendus lorsque la cadence imposée augmentait. Ce résultat indique un déchet de production plus important à l'origine de la baisse de l'efficacité de production. La cadence de production est à mettre en lien avec les différents facteurs humains (Taleb, 2022). Des facteurs humains médiocres augmenteraient le nombre d'erreurs humaines (Givi et al., 2015). Ainsi, la cadence imposée semble être devenue trop rapide pour le participant, dépassant ses capacités. Par conséquent, au moins une étape de fabrication n'était pas réalisée correctement pour assembler le produit, le rendant défectueux.

Pour résumer, la production semble augmenter en même temps que la cadence imposée jusqu'à atteindre un plateau selon les capacités de l'opérateur. Une fois le plateau atteint, les déchets de production se multiplient et réduisent l'efficacité de production du système hybride dans sa tâche.

6.3.1.2 Mener la cadence : légèrement bénéfique pour la production mais dépendant des capacités de l'opérateur

Pour rappel, la cadence imposée moyenne correspondait à la cadence de la condition COB2s de la première expérimentation, où cette cadence était en moyenne de quatre produits fabriqués en trois minutes, soit seize étapes. Les deux autres cadences ont été choisies arbitrairement, avec trois produits en treize étapes pour la cadence la moins élevée et cinq produits en vingt étapes pour la cadence la plus élevée. Il est à noter également que la condition DM dans cette étude était similaire à la condition COB2s de l'étude précédente. La différence entre la condition DM et AUTO-MEAN résidait donc dans le meneur de la cadence, respectivement le participant et le cobot. La coordination du travailleur humain restait similaire tout au long de l'étude avec une coordination pro-active (Huang et al., 2015) avec un contrôle prédictif lorsqu'il menait la cadence mais pas lorsque celle-ci lui était imposée. En revanche, la coordination du cobot dépendait de la condition. Lorsque le participant menait la cadence le cobot avait une coordination réactive, attendant le signal du participant pour effectuer sa sous-tâche, tandis que sa coordination était adaptative lorsqu'il menait la cadence (Huang et al., 2015).

Il est tout d'abord intéressant d'observer que lorsque le participant menait la cadence de production, les performances (près de quatre produits pour un peu plus de seize étapes)

semblent être similaires à celles attendues avec la cadence imposée (quatre produits pour seize étapes). Il a été observé dans la littérature que mener la cadence pour l'humain dans un système hybride améliorerait la production par rapport au fait de la suivre (Dempsey et al., 2010). En effet, dans leur article, la production avait été plus importante en menant la cadence plutôt qu'en suivant cette cadence. Cette différence de résultat peut s'expliquer d'une part par le fait que la cadence imposée moyenne correspondait ici aux capacités des opérateurs observées lors de l'Etude 1 tandis que dans l'article de Dempsey et ses collaborateurs (2010) la cadence était dite comme moyenne alors que les participants avaient été entraînés à travailler à une cadence plus importante. D'autre part, les limites du cobot, comme expliquées dans la première étude, empêcheraient l'opérateur humain de réellement travailler à la cadence souhaitée, devant attendre que le cobot ait terminé sa sous-tâche pour débiter la sienne. Dans ce système hybride réalisant cette tâche motrice, la performance de production n'a pas été maximale en raison des limites du cobot.

Donc, la production était similaire lorsque le participant menait la cadence et lorsqu'il la suivait à la cadence imposée moyenne, même si le nombre d'étapes réussies était supérieur lorsque le participant menait la cadence. Cette différence peut s'expliquer par le déchet de production présent lorsque le participant suivait la cadence, même si cela ne semble pas avoir influencé la production finale sur l'essai de trois minutes. Il pourrait être intéressant d'observer si un effet peut être visible sur une période plus longue.

Il est également observé ici que le nombre de produits correctement fabriqués en menant la cadence ne différait pas avec la cadence imposée rapide, malgré un nombre d'étapes réussies inférieur. En raison de la diminution de l'efficacité de production avec la cadence imposée rapide qui était au-delà des capacités du travailleur humain, il semble être plus bénéfique de mener la cadence de production à une cadence libre plutôt que de la suivre à une cadence qui ne peut être suivie par l'opérateur humain. Cependant, dans notre étude, les participants n'étaient pas de réels opérateurs, ce qui pourrait interroger sur leur motivation à réussir au maximum la tâche motrice comparativement à des opérateurs qui effectuent leur travail. Il serait donc intéressant d'étudier ces différentes caractéristiques de la cadence chez de vrais opérateurs pour observer si ces résultats correspondent.

Lors des comparaisons entre mener et suivre la cadence de production, nous débiterons d'abord par nous intéresser à comparer lorsque le participant menait la cadence avec la cadence imposée

moyenne (i.e., conditions DM et AUTO-MEAN), donc à « cadences similaires ». Ensuite nous nous intéresserons à comparer lorsque le participant menait la cadence avec les cadences imposées lente et rapide.

6.3.2 La qualité des interactions dépendante du rythme de la cadence et non du meneur

6.3.2.1 Un opérateur plus actif avec une forte cadence et en menant la cadence

En accélérant la cadence de production, le nombre de sous-tâches du participant et du cobot à effectuer ont augmenté en parallèle avec le même temps de travail. Pour les deux travailleurs du système hybride, il a été observé une diminution du taux d'inactivité lorsque la cadence augmentait, et donc un taux d'activité plus important pour ces deux travailleurs (les résultats sont similaires pour les deux types d'activité du participant). Comme dans l'étude précédente, il est à noter que les taux d'activité et d'activité directe du participant sont corrélées aux nombres de produits fabriqués et d'étapes réussies. Puisque l'activité du participant mesurée ici correspond aux « temps pendant lequel un agent travaille directement à sa tâche »¹⁶ comme défini par Collewet et Sauermann (2017, p. 14), les résultats de notre étude semblent cohérents avec ceux de la littérature où plus le temps de travail de l'opérateur est effectif, plus la production est importante (Collewet & Sauermann, 2017 ; Golden, 2012).

Lorsque le cobot menait la cadence, le participant devait s'adapter au temps qu'il avait pour réaliser sa sous-tâche entre deux actions successives du cobot. En effet, pour les différentes cadences imposées, le cobot menait la cadence. En revanche ce n'est pas sa vitesse pour effectuer une sous-tâche qui différait, mais le temps entre deux sous-tâches (i.e., ses temps d'inactivités). Donc, plus la cadence était rapide, moins de temps le participant avait pour réaliser sa sous-tâche. La fenêtre temporelle d'action du participant se réduisait, ce qui a obligé le participant à effectuer ses sous-tâches de manière plus rapide (i.e., diminution du temps médian d'une activité directe en augmentant la cadence imposée).

A production similaire (i.e., DM et AUTO-MEAN), le cobot était moins actif lorsque le participant menait la cadence de production, tandis que le participant était lui plus actif. Le fait

¹⁶ Time during which an agent is directly working on his or her main task

de mener la cadence a donc modifié les comportements du cobot et du participant. Nous avons vu précédemment que le nombre d'étapes réussies était légèrement supérieur lorsque le participant menait la cadence, ce qui peut expliquer cette activité plus importante de l'opérateur. Certes le participant était plus actif, mais cela ne s'est pas traduit au niveau du socle central. En effet, les phases d'activité ont été plus importantes par des actions en dehors du socle central plus longues (i.e., le temps médian d'une activité indirecte du participant). Ainsi, lorsque le participant suivait la cadence, il a accéléré ses mouvements préparatoires à la fabrication du produit (i.e., prendre les composants dans les bacs) pour être prêts à effectuer ses sous-tâches plus rapidement, mais il attendait plus longtemps avant d'effectuer son action. La perte du contrôle de la cadence a donc modifié le comportement de l'opérateur qui a cherché à être prêt plus rapidement malgré une fenêtre temporelle similaire.

Le participant a donc été plus actif en menant la cadence de production, avec des temps de repos médians moins importants que lorsqu'il suivait la cadence. Une modification relativement similaire du comportement de l'opérateur a déjà été observée dans la littérature (Dempsey et al., 2010). En effet, dans leur étude, il avait été observé qu'en menant la cadence de production, les opérateurs avaient amélioré leur production en diminuant les temps de cycle, mais cette baisse du temps de cycle était due à une réduction de leurs temps de repos pour améliorer leur performance de production mais pas à une accélération de leurs actions. Dans leur étude, les auteurs avaient choisi une cadence imposée « moyenne » qui semblait ne pas atteindre les limites de capacités des opérateurs puisqu'ils étaient entraînés à une cadence légèrement plus importante (Dempsey et al., 2010). Ce qui n'a pas été le cas dans notre étude où ce choix a été fait selon les préférences et capacités de l'opérateur dans l'Etude 1, ce qui explique la différence dans les performances de production. Le changement de comportement de l'opérateur, par sa réduction des temps de repos, pose question quant à sa récupération, et donc à sa fatigue et sa santé. Nous allons voir par la suite les possibles répercussions sur les sollicitations biomécaniques sur l'opérateur et sur sa charge cognitive.

6.3.2.2 Des interactions entre le système hybride plus fluide avec une cadence plus importante

L'activité plus importante des deux travailleurs du système hybride a également mené à davantage d'interactions entre l'humain et le cobot avec une cadence imposée plus rapide. En effet, la fluidité du travail collaboratif entre les deux a été améliorée, par une diminution des

taux de temps morts et une augmentation des taux de collaboration et collaboration directe, témoignant d'une meilleure qualité des interactions entre les deux travailleurs (Hoffman, 2019 ; Hoffman & Breazal, 2007).

Concernant les interactions entre l'humain et le cobot, aucune différence n'a été observée lorsque la production était similaire pour les deux meneurs de cadence (i.e., DM et AUTO-MEAN). Ainsi, mener ou suivre la cadence pour les participants ne semble pas avoir influencé ces interactions. Malgré les différentes coordinations du cobot selon son rôle (Huang et al., 2015), les interactions semblent plutôt être dépendantes de la coordination de l'opérateur humain qui reste pro-active. En menant ou en suivant la cadence, les participants se sont continuellement adaptés aux comportements du cobot, limités techniquement dans notre étude. En effet, la vitesse d'exécution du cobot, mais aussi son temps de réaction quand le participant menait la cadence ont contraint le participant à attendre la fin de l'action du cobot pour réaliser sa sous-tâche, limitant les temps de collaboration et notamment de collaboration directe. La majorité des collaborations entre ce système hybride n'était pas au niveau du socle central, mais plutôt lorsque le participant agissait en dehors de ce socle.

Ici, la tâche de travail correspond à une successivité de sous-tâches des deux-travailleurs et non à des sous-tâches réalisées ensemble. En utilisant la classification des HRI de Lamy (2011) basée sur les catégories de co-manipulations, la tâche dans cette étude correspond à une co-manipulation sérielle pour l'assemblage du produit. Dans une tâche de co-manipulation parallèle, où les efforts de l'humain et ceux du robot s'ajoutent pour former un effort final au niveau de l'outil ou de l'objet, comme pour des tâches observées dans d'autres études (Peternel et al., 2018 ; Vianello et al., 2023), les deux travailleurs agissent de manière simultanée. Ce type de co-manipulation engendre une forte augmentation de la collaboration. Le rôle du meneur est prépondérant dans ces tâches de co-manipulation parallèle.

Dans notre étude, les termes « Inactivité » et « Temps mort » se penchent uniquement sur la notion de production et d'interaction et non sur le comportement moteur des travailleurs. Ainsi, lors de ces actions et interactions, c'était le processus de fabrication du produit qui était à l'arrêt et non le participant qui pouvait se mouvoir dans l'espace sans apporter de plus-value à la production. Ces moments d'inactivités pour un opérateur pourrait servir d'une part à être un temps de repos (Dempsey et al., 2010), mais pourrait aussi être alloués pour la réalisation d'une autre tâche si ces temps d'attente sont trop importants (e.g., chargement ou déchargement,

action sur un autre poste de travail à proximité, comptage du nombre de produits en cours, vérification de la qualité du produit, etc.).

Lorsque la cadence était la plus faible, les inactivités des deux travailleurs et les temps morts étaient importants, témoignant d'une mauvaise utilisation des ressources pour l'activité collaborative (Hoffman, 2019 ; Hoffman & Breazal, 2007). En revanche, avec une cadence imposée plus rapide, ces temps diminuent indiquant une meilleure utilisation des ressources pour l'activité collaborative, qui peut être interprété comme une meilleure synchronisation entre les deux travailleurs avec des interactions de plus haut niveau (Hentout et al., 2019).

Cependant, moins de temps mort signifie également une diminution des temps de repos pour le travailleur humain lorsque la cadence était plus importante. De plus, ces temps d'inactivité (i.e., temps médian d'une inactivité) étaient moins longs pour le participant, réduisant donc le temps dans des positions plus reposantes, donc moins sollicitantes pour l'opérateur. Ainsi, une cadence de production trop rapide pourrait avoir des répercussions négatives sur la santé de l'opérateur humain (Dempsey et al., 2010). Il est donc important de choisir une cadence optimale pour le poste de travail, que ce soit d'un point de vue productivité mais aussi santé de l'opérateur.

6.3.3 La santé de l'opérateur : des sollicitations biomécaniques et une charge cognitive influencées par le rythme de la cadence et non par le meneur

6.3.3.1 Une posture plus à risque avec une cadence plus rapide...

Le risque de développer des TMS a été mesuré par la posture, et notamment l'évaluation RULA (McAtamney & Corlett, 1993). Pour les deux côtés, il a été observé un score RULA plus important pour la cadence imposée la plus rapide par rapport à la cadence imposée moyenne. Nous avons vu précédemment qu'un seuil pour la production a été observée entre ces deux cadences où le participant n'avait plus les capacités de maintenir le rythme de la cadence. Ce seuil semble être similaire pour la posture, où celle-ci serait plus à risque de développer des TMS lorsque la cadence imposée dépasserait les capacités de l'opérateur, mettant en danger sa santé pour essayer de maintenir la production. Toutefois, ces résultats pourraient être nuancés par les temps dans les différents scores de l'évaluation RULA. En effet, dans la comparaison entre AUTO-MEAN et AUTO-FAST où les scores RULA différaient, il a été observé que les

opérateurs ont passé plus de temps dans des positions à risque (i.e., forts risques avec r6 pour le côté gauche et modérés avec r4 pour le côté droit). L'absence de différence significative pour les autres scores peut être expliquée par la forte hétérogénéité des pourcentages de temps pour chaque score (des coefficients de variation très souvent supérieurs à 50% et à plusieurs reprises supérieures à 100%, Tableau 16).

A partir des évaluations RULA, cette dégradation est observable au niveau des articulations du dos et de l'épaule gauche. Cette dégradation peut s'expliquer par une augmentation de l'effort musculaire à fournir avec l'augmentation de la cadence imposée, qui se montrerait par la position angulaire moyenne de ces articulations, mais aussi de la nuque, de l'épaule droite et des deux coudes. En effet, en moyenne, la position angulaire de ces articulations était plus éloignée de leur position optimale, nécessitant une dépense d'énergie supplémentaire avec une activité musculaire plus importante pour compenser la perte de force (Chaffin et al., 2006 ; Moore et al., 2011). Il a d'ailleurs été montré dans des études antérieures que l'activité musculaire augmentait avec une cadence plus rapide lors d'une tâche répétitive (Gooyers & Stevenson, 2012 ; Laursen et al., 1998 ; Mathiassen & Winkel, 1996 ; Sundelin, 1993). Ainsi, le muscle se fatigue de manière plus importante avec une cadence élevée, et à long terme pourrait être une des causes de TMS chez les opérateurs.

L'augmentation des sollicitations biomécaniques sur l'opérateur avec une plus forte cadence de production est liée au fait que l'opérateur est plus souvent actif (Mathiassen & Winkel, 1996). En effet, il a été observé, pour les deux côtés, que les scores RULA pendant les deux types d'activité du participant, étaient plus importants que les scores RULA pendant les inactivités. Puisque le participant est plus souvent actif, donc plus souvent dans des postures plus à risque, l'augmentation de la cadence est donc un facteur qui semble accroître les risques de développer des TMS pour l'opérateur.

6.3.3.2 ... avec une charge cognitive plus importante

Dans cette étude, la charge cognitive a été mesurée par les ressources attentionnelles disponibles à la réalisation d'une tâche secondaire (i.e., la tâche auditive) et par l'évaluation de la charge de travail perçue par le NASA-TLX.

Bien que le taux de réussite à la tâche auditive fût similaire pour les trois cadences imposées, l'erreur absolue était plus importante dans les deux cadences les plus rapides. Dans cette situation de double tâche, le niveau de difficulté de la tâche secondaire était similaire pour toutes les cadences. Par conséquent, la baisse de performance de la tâche secondaire indique une diminution des ressources attentionnelles disponibles pour la réalisation de cette tâche secondaire, donc d'une augmentation du niveau de difficulté de la tâche motrice (Serrien, 2009). En fait, pour maintenir les performances à la tâche principale au maximum, davantage de ressources attentionnelles sont nécessaires (Polskaia & Lajoie, 2016 ; Richer & Lajoie, 2019), au détriment de la tâche secondaire car il faut traiter plus d'informations pour réaliser la tâche principale. Il avait été demandé aux participants de ne prioriser aucune des tâches. C'est pourquoi les performances aux deux tâches ont diminué et ne sont plus optimales. En priorisant une des deux tâches, les performances à celle-ci auraient pu être maintenues (Rhodes et al., 2019).

La charge de travail perçue a augmenté avec la hausse de la cadence imposée. De fait, les scores au NASA-TLX étaient les plus importants pour la cadence la plus rapide. Cette augmentation peut s'expliquer à partir des scores des trois dimensions du NASA-TLX influencées par la hausse de la cadence imposée : l'exigence mentale, l'exigence temporelle et l'effort. Tout d'abord, concernant l'exigence temporelle, ce résultat est cohérent avec la pression temporelle subie par l'opérateur avec la réduction de la fenêtre temporelle pour réaliser ses sous-tâches. En effet, la notion de cadence est abordée dans l'exigence temporelle. En prenant la version originale du NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), la question demandée, simplement traduite, est « Quelle pression temporelle avez-vous ressentie en raison de la cadence ou du rythme auquel les tâches ou les éléments de tâches se sont déroulés ? Le rythme était-il lent et tranquille ou rapide et effréné ?¹⁷ ». Ensuite, l'effort est lié à l'exigence mentale par la définition de cette dimension. Pour répondre à cette dimension, la question posée est « Quel a été la difficulté d'accomplir (mentalement et physiquement) la tâche avec un niveau de performance tel que le vôtre ? » (Cegarra & Morgado, 2009). L'augmentation de l'exigence mentale observée ici se répercute donc sur le score de l'effort dans ce questionnaire. A noter que l'exigence physique n'a pas été perçue comme plus importante avec une forte cadence imposée, cela peut

¹⁷ How much time pressure did you feel due to the rate or pace at which the tasks or task elements occurred? Was the pace slow and leisurely or rapid and frantic? »

s'expliquer par la faible demande physique de la tâche (peu de force à produire et peu de posture à très haut risque pour fabriquer le produit).

La charge de travail perçue plus importante est à mettre en lien avec les risques de développer des TMS. En effet, la charge de travail est un facteur psycho-social faisant parti des facteurs d'apparition de TMS dans le modèle dynamique de l'INRS (Uguen et al., 2018). Une charge de travail trop importante est donc un facteur de risques d'apparition de TMS (Habibi et al., 2015 ; Khandan et al., 2018 ; Larsman & Hanse, 2009). De plus, il a été montré des scores élevés pour les dimensions de l'exigence mentale et de l'effort chez des personnes souffrant de TMS (Besharati et al., 2020 ; Darvishi et al., 2016).

Par conséquent, les résultats de notre étude semblent indiquer qu'une forte cadence imposée dans une tâche collaborative pour un système hybride augmente la charge cognitive de l'opérateur, ce qui accroît les risques d'apparition de TMS pour celui-ci.

6.3.3.3 Suivre la cadence ne présente pas plus de risque pour la santé de l'opérateur lorsque celle-ci est adaptée à ses capacités

La posture du tronc et des membres supérieurs ne semble pas différer entre mener et suivre la cadence pour l'opérateur. Exceptées une flexion de l'épaule gauche et une extension du poignet droit ainsi qu'un temps plus important dans le score r6 pour le côté droit plus importants en menant la cadence de production, ni les scores RULA ni les positions moyennes des angulations ne différaient entre ces deux conditions. De plus, aucune différence n'a été observée entre les scores RULA pendant les trois actions du participant, ce qui semble appuyer sur le fait que les sollicitations biomécaniques sur l'opérateur ne sont pas modifiées par la gestion de la cadence de production ou non par l'opérateur. Par conséquent, mener ou suivre la cadence à production similaire ne semble pas augmenter les risques de développer des TMS concernant les sollicitations biomécaniques.

Cependant, cette tâche motrice est certes répétitive mais les différentes actions de l'opérateur varient pour la fabrication d'un produit. Ainsi, les analyses des sollicitations biomécaniques ne sont pas effectuées pour un geste précis mais pour une multitude de gestes, contrairement aux études dans la littérature (Escorpizo & Moore, 2007 ; Gooyers & Stevenson, 2012 ; Lomond & Côté, 2010 ; Srinivasan et al., 2015). Il n'est donc pas possible d'évaluer ici si mener la cadence

(i.e., l'opérateur décide quand effectuer le geste et à quelle vitesse) ou la suivre (i.e., avoir une pression temporelle pour le réaliser) a une influence sur les sollicitations biomécaniques lors de la réalisation d'un geste unique dans une situation de travail collaborative avec le cobot.

Autre facteur de risque de développer des TMS, la charge cognitive ne semble pas avoir été influencé par la gestion de la cadence. En effet, les performances à la tâche auditive était similaire, donc la demande attentionnelle ne semble pas avoir augmenté, et la charge de travail perçue n'a pas différencié entre les deux conditions. Suivre la cadence de production pour l'opérateur conduit à une réduction de son autonomie et à une dépendance de la cadence de travail du cobot. Lorsque le cobot menait la cadence, son autonomie a été plus importante, notamment du fait de sa plus grande automatisation, puisque le participant n'avait plus besoin d'intervenir pour que le cobot agisse (avec la disparition du boîtier). Dans ce système hybride, la perte d'autonomie et la dépendance de l'opérateur ne semble pas avoir augmenté la charge cognitive de l'opérateur.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux facteurs humains dans les HRI du point de vue de la posture de l'opérateur et de sa charge de travail. D'un point de vue facteurs psychosociaux dans les facteurs de risques d'apparition de TMS (Uguen et al., 2018), seule la charge de travail perçue a été mesurée ici. D'autres mesures pourraient être effectuées pour étudier ces facteurs dans le fait de mener la cadence ou de la suivre telles que l'autonomie perçue du travailleur, son contrôle perçu sur le cobot, mais également l'appréciation de la tâche ou l'acceptation du cobot dans la situation de travail collaborative (van Geffen, 2021). L'autonomie perçue est une notion essentielle pour la qualité du travail collaboratif mais aussi pour la satisfaction de l'opérateur de travailler en interaction avec un cobot (Tausch & Kluge, 2020). La perte de l'autonomie de l'opérateur pourrait être perçue comme un sentiment d'infériorité par l'opérateur (Meissner et al., 2020). Lorsque le cobot menait la cadence, son autonomie était plus importante que lorsque le participant la menait. Dans une étude antérieure (van Geffen, 2021), l'autonomie du cobot a varié en changeant son rôle, entre meneur et suiveur. Comme dans notre expérience, le participant menait la cadence en appuyant sur un bouton pour déclencher les actions du cobot, tandis que lorsque le participant menait la cadence ce bouton n'était plus présent. Il a été observé une autonomie perçue plus importante lorsque l'opérateur menait la cadence que lorsqu'il devait la suivre, mais une baisse de la perception de contrôle perçu sur le cobot ainsi qu'une baisse de l'appréciation de la tâche. Le fait de ne pas mener la

cadence pour l'opérateur a donc réduit son autonomie au travail, et par conséquent sa satisfaction au travail (Humphrey et al., 2007).

Nous avons souhaité mesurer le stress des participants au travers de la fréquence cardiaque. Aucune différence de la FC n'a été observée entre le fait de mener la cadence et de la suivre, quelle que soit la vitesse de celle-ci. Cependant, dans l'étude de Pollak et collaborateurs (2020), le stress des opérateurs étaient plus importants lorsqu'ils perdaient de l'autonomie dans leur tâche, notamment lorsqu'il devait suivre la cadence. Ce stress plus important en suivant la cadence peut correspondre à des sentiments de perte de contrôle, de sécurité et d'identité pour l'opérateur (Stein et al., 2019). Par conséquent, la perte de la prise de décision pour l'opérateur humain pourrait engendrer des émotions et des réactions cognitives négatives pour l'opérateur qui pourrait impacter la productivité (Gombolay & Shah, 2014). Nos résultats diffèrent donc de ceux dans la littérature, mais cela peut s'expliquer par la limite de la mesure de stress effectuée. En effet, il est possible de s'intéresser au stress objectif des opérateurs à partir d'outils de mesure, donc le cardiofréquencemètre. Cependant, la mesure de la FC n'est pas la plus fiable. La HRV est une mesure plus fiable du stress, cependant l'outil utilisé n'a pas permis cette mesure car il n'enregistrait pas l'intervalle RR. Il aurait également été possible de mesurer le stress subjectif des opérateurs comme dans l'étude de Pollak et collaborateurs (2020). Ainsi, il pourrait être intéressant d'ajouter des mesures plus fiables du stress ou de l'évaluer de manière subjective pour observer le stress dans les différentes conditions mesurées.

Ainsi, à production similaire, mener ou suivre la cadence de production dans une tâche collaborative dans un système hybride ne semble pas influencer les facteurs de risques de développer des TMS. Cependant, le fait de suivre la cadence pour l'opérateur pourrait dégrader certains facteurs psycho-sociaux dans le travail collaboratif par rapport au fait de mener la cadence.

6.4 Conclusion

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer l'influence d'une cadence imposée par le cobot dans une situation de travail collaboratif dans un système hybride sur la production, la qualité des interactions et les sollicitations biomécaniques et la charge cognitive de l'opérateur. Lors de cette tâche collaborative avec ce système hybride, les interactions entre l'humain et le cobot

ont été augmenté ainsi que la production en une cadence imposée plus rapide. En revanche, la production s'est stabilisée à un certain seuil de la cadence lorsque celle-ci dépassée ses capacités à la suivre, par une augmentation des erreurs de production de l'opérateur qui a engendré une dégradation de l'efficacité de production avec du déchet. De plus, une cadence imposée plus rapide a semblé plus à risque du point de vue de la santé du travailleur humain, puisque sa demande attentionnelle, sa charge de travail perçue ainsi que ses sollicitations biomécaniques ont été plus importantes avec l'augmentation de la cadence.

Le second objectif de cette étude était d'évaluer l'influence de la gestion de la cadence par l'opérateur ou le cobot dans la situation de travail collaboratif sur la production, la qualité des interactions et les sollicitations biomécaniques et la charge cognitive de l'opérateur. Mener la cadence de production pour l'opérateur humain a été légèrement bénéfique pour la production, du fait d'une meilleure efficacité de production par rapport au fait de la suivre à la cadence qui semble correspondre à ses capacités. Cependant, ni les interactions entre les deux travailleurs ni les sollicitations biomécaniques ni la charge cognitive de l'opérateurs n'ont été influencé par le fait de mener ou non la cadence de production.

Par conséquent, le choix de la cadence de production dans une situation collaborative d'un système hybride devrait se faire en adéquation avec les capacités de l'opérateur à réaliser la tâche. En effet, une cadence trop lente serait préjudiciable pour la production et pourrait engendrer des sentiments d'ennui et de dévalorisation pour l'opérateur tandis qu'une cadence trop élevée ne serait pas bénéfique pour la production et mettrait en danger la santé de l'opérateur. Ainsi, la cadence de production est un paramètre essentiel à penser lors de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail, en choisissant une cadence de production optimale, adaptée aux capacités de l'opérateur, qui permettrait une production la plus efficace possible, une acceptation facilitée du cobot sur le poste de travail et d'impacterait pas négativement le capital santé des opérateurs.

7 DISCUSSION GENERALE

7.1 Récapitulatif des résultats : un système hybride moins performant mais moins à risque pour la santé de l'opérateur, en lien avec la cadence

Ce travail de thèse se décompose en deux études qui avaient pour but d'analyser les répercussions d'un système hybride constitué d'un humain et d'un cobot sur les performances de production, sur les interactions entre les deux travailleurs et sur les risques pour la santé de l'opérateur. L'Etude 1 a comparé un système humain et un système hybride lors de la réalisation d'une tâche d'assemblage de produits par deux travailleurs en interaction. L'Etude 1 a également analysé l'influence de deux niveaux de difficulté d'une tâche cognitive secondaire sur les paramètres énoncés précédemment. L'Etude 2 a analysé l'influence d'une part de plusieurs cadences imposées et d'autre part du meneur de cette cadence sur ces différents paramètres.

Les systèmes (humain et hybride) ont fabriqué des produits en assemblant différents composants sur un plan de travail collaboratif. Chaque travailleur exécutait des sous-tâches prédéfinies pour fabriquer le produit, travaillant en interaction. Les participants ont réalisé une tâche cognitive secondaire pour mesurer les ressources attentionnelles disponibles par les performances à cette tâche. Dans l'Etude 1, la tâche cognitive avait deux niveaux de difficulté pour comparer l'influence de différentes charges cognitives de l'opérateur, tandis que dans l'Etude 2 le niveau de difficulté était unique (le plus difficile des deux de l'Etude 1). La qualité des interactions a été évaluée par les actions conjointes du participant et du co-travailleur lors de la réalisation de la tâche motrice. A partir des différents facteurs de risques d'apparition des TMS, d'après le modèle de l'INRS (Uguen et al., 2018), nous avons évalué les risques pour la santé de l'opérateur en mesurant : les sollicitations biomécaniques par la posture, notamment par les évaluations RULA et la position des articulations (Etudes 1 & 2) ; des facteurs psychosociaux par la charge cognitive à travers les performances à la tâche secondaire (Etude 1 & 2), le comportement oculomoteur (Etude 1) et la charge de travail perçue (Etude 2) ; le stress par la fréquence cardiaque (Etude 2).

7.1.1 Une production dépendante des capacités du cobot ?

Dans l'Etude 1, la production a été plus importante par le système humain que par le système hybride. En effet, celle-ci était environ 50% supérieure pour le système humain. Cette différence de production a pu être expliquée par les changements dans les comportements des travailleurs avec d'une part une réduction du temps d'activité des participants et d'autre part une augmentation de ce temps d'activité pour le co-travailleur cobot par rapport au co-travailleur humain. En fait, le co-travailleur cobot a été certes plus actif, mais ses actions étaient plus longues. Cet allongement des temps d'action du co-travailleur cobot est dû aux limites de celui-ci, ce qui explique la vitesse d'exécution moins importante que l'humain (ici la vitesse était limitée à 1,5m/s) et un « temps de réaction » plus important. Ainsi, malgré une plus forte activité que le co-travailleur humain, le co-travailleur cobot a réalisé moins de sous-tâches que son homologue humain, résultant en une production moins importante par le système hybride que par le système humain. Ces modifications de comportement ont donc dégradé la qualité des interactions pour le système hybride, ce qui a engendré une mauvaise utilisation des ressources (le cobot) et une dégradation de la synchronisation entre les travailleurs (Hentout et al., 2019).

Le meneur de la cadence de l'Etude 1 a toujours été le participant. Sa coordination était proactive, lui permettant d'anticiper les moments d'effectuer sa sous-tâche (Huang et al., 2015). En revanche, le co-travailleur n'avait pas exactement la même coordination. En effet, le co-travailleur cobot avait une coordination réactive, attendant la consigne d'effectuer sa sous-tâche par le participant, tandis que le co-travailleur humain avait été limité à une coordination adaptative (Huang et al., 2015). Si le co-travailleur humain avait été libre d'avoir une coordination pro-active, la différence de production aurait pu être encore plus importante. Ainsi, un système humain semble avoir de meilleures performances de production qu'un système hybride, qui semble limité par les capacités du cobot.

Cependant, dans les cas de tâches industrielles, le meneur de la cadence peut être l'opérateur humain, avec une cadence libre ou imposée, obligeant l'opérateur à suivre le rythme pour maintenir l'efficacité de production au maximum (Bao et al., 2016). Les résultats de l'Etude 2 ont montré qu'une cadence de production menée par l'opérateur humain pourrait être bénéfique à la production. En effet, l'efficacité de production est plus importante, voire maximale, si l'humain mène la cadence alors que lorsqu'il la suit cette efficacité de production est moindre. Malgré ce seul bénéfice, mener la cadence pour l'opérateur humain pourrait poser questions

concernant sa santé. L'opérateur pourrait négliger ses temps de récupération pour améliorer la production (Dempsey et al., 2010), engendrant à plus long terme de la fatigue, voire des TMS. Dans l'Etude 2, le cobot avait une coordination adaptative du fait de sa programmation, où chaque étape de la fabrication du produit était temporellement imposée. Si le cobot pouvait avoir une coordination pro-active, il pourrait agir en fonction du travail de l'opérateur humain en effectuant ses actions à des moments optimaux pour le processus de fabrication, permettant une meilleure production (Huang et al., 2015). Les limites technologiques du cobot utilisé dans ces études n'ont pas permis au cobot d'avoir une coordination pro-active au cobot.

Il a également été observé dans l'Etude 2, que lorsque la cadence imposée par le cobot était la plus importante, la production n'avait pas été améliorée en raison d'une dégradation de l'efficacité de production (i.e., plus de déchets). Lorsque la cadence imposée dépasse les capacités de l'opérateur humain, le système hybride n'est plus aussi efficace. Ainsi, les capacités du cobot, mais aussi de l'opérateur humain, doivent être prises en compte dans le choix de la cadence de production.

7.1.2 Une posture moins à risque face au cobot ?

Les sollicitations biomécaniques sont considérées comme étant le principal facteur d'apparition de TMS chez les travailleurs (Uguen et al., 2018). Certaines postures sont à risques pour la santé de l'opérateur en raison de fortes sollicitations biomécaniques. Effectuer des actions avec les articulations loin de leurs positions optimales engendre également une sollicitation musculaire plus importante. Par conséquent, la dépense d'énergie est plus importante pour compenser la perte de force liée à une modification de la longueur du muscle pour réaliser le geste (Jain et al., 2019 ; Moore et al., 2011). Dans ces études, la posture de l'opérateur humain a été analysée d'une part avec les évaluations RULA (McAtamney & Corlett, 1993), et d'autre part en considérant les positions moyennes des articulations pour les comparer à leur position optimale. En nous appuyant sur les articles de Jain et ses collaborateurs (2019) et de Moore et ses collaborateurs (2011), mais aussi sur les mesures utilisées avec l'évaluation RULA (McAtamney & Corlett, 1993), il est communément considéré que : pour les poignets, la déviation radiale / ulnaire ainsi que la flexion / extension doivent être minimales ; pour le coude la flexion est d'environ 90° ; pour l'épaule la flexion est d'environ 45° sans abduction / adduction.

Les sollicitations biomécaniques ont été plus importantes lorsque l'opérateur a travaillé avec le co-travailleur humain qu'avec le co-travailleur cobot dans l'Etude 1. Il a également été observé que les scores RULA étaient plus élevés pour les deux côtés lorsque les participants étaient en activité plutôt qu'en inactivité. Avec une activité plus importante dans le système humain, l'augmentation des sollicitations peut être liée à la différence de cadence de production entre les deux systèmes. De plus, les scores RULA globaux étaient corrélés au nombre de produits fabriqués. Ainsi, ces résultats nous ont interrogés sur l'origine de la réduction des sollicitations biomécaniques dans le système hybride par rapport au système humain : cette réduction est-elle liée à la cadence de production moindre pour le système hybride ou est-elle liée à la présence d'un co-travailleur cobot à la place du co-travailleur humain ?

L'Etude 2 a comparé ces sollicitations pour plusieurs cadences imposées. Il a été observé que les sollicitations biomécaniques augmentaient avec la cadence imposée. Cette augmentation s'explique par une augmentation de l'activité de l'opérateur dans des postures plus à risques pour effectuer sa sous-tâche que lorsqu'il est au repos (Dempsey et al., 2010). Ainsi, l'Etude 2 semble appuyer l'idée que la diminution des risques d'apparition de TMS par la baisse des sollicitations biomécaniques pour le système hybride est liée à la cadence de production moins importante. Cependant, l'idée que la présence du co-travailleur cobot réduise ces sollicitations par rapport au co-travailleur humain n'est pas à écarter. En effet, il faudrait comparer un geste moteur similaire et répétitif face à ces deux co-travailleurs pour étudier uniquement l'influence du co-travailleur sur ces sollicitations.

Dans l'Etude 1, il a été observé que malgré la cadence de production moins importante dans le système hybride par rapport au système humain, l'opérateur effectuait ses actions à la même vitesse dans les deux systèmes. En revanche, dans l'Etude 2, l'augmentation de la cadence imposée a accéléré la vitesse d'exécution de l'opérateur pour réaliser ses sous-tâches. Cette accélération du geste peut engendrer une posture plus à risques pour l'opérateur, ce dernier cherchant en priorité à terminer sa sous-tâche le plus rapidement possible dans la fenêtre temporelle allouée au détriment de sa santé et de sa sécurité (Dempsey et al., 2010).

Concernant le fait de mener la cadence ou de la suivre, les résultats de l'Etude 2 ont semblé indiquer que la posture de l'opérateur n'était pas influencée par la gestion de la cadence, mais uniquement par sa vitesse qui dégrade la posture lorsqu'elle est rapide.

7.1.3 Attention, stress et charge cognitive : effets de la cadence ou du cobot ?

Dans ce travail, des facteurs psycho-sociaux ont été étudiés. Il s'agit plus spécifiquement de la charge cognitive à travers l'attention visuelle (Etude 1), la double tâche (Etude 1 & 2), la charge de travail perçue (Etude 2) et le stress (Etude 2).

Le stress a été mesuré par un cardiofréquencemètre où la FC des participants a été enregistrée en continu. Les résultats n'ont montré aucune différence de FC moyenne pour les différentes cadences imposées, ni pour le meneur de la cadence. En fait, l'absence de résultat peut s'expliquer par les limites de l'outil utilisé et de la variable mesurée, ces deux limites étant liées. La variabilité de la fréquence cardiaque est une mesure de plus en plus fréquente dans la littérature, mais surtout fiable pour évaluer le stress (H.-G. Kim et al., 2018). Cependant, le cardiofréquencemètre utilisé dans l'Etude 2 ne renseignait pas sur cette variabilité en raison de la faible fréquence d'acquisition (1Hz). Ainsi, seule la FC a été mesurée. Le stress n'a donc pas réellement été mesuré dans ce travail de thèse.

Dans l'Etude 1, les comportements oculomoteurs de l'opérateur ont été mesurés et l'exploration visuelle semblait plus en mode ambient dans le système hybride et plus en mode local dans le système humain (Unema et al., 2005). L'exploration visuelle a donc semblé plus intense face au co-travailleur cobot que face au co-travailleur humain. L'opérateur a extrait davantage d'informations de son environnement dans le système hybride, alors que la cadence de production était moins rapide. Cette exploration visuelle plus intense face au co-travailleur cobot pourrait causer une augmentation de la charge attentionnelle de l'opérateur.

Il a été observé dans l'Etude 1 que travailler avec un cobot ou avec un humain ne semblait pas affecter cette demande car les performances à la seconde tâche auditive étaient similaires malgré une meilleure performance à la tâche motrice face au co-travailleur humain. Toutefois, lorsque la tâche auditive était la plus difficile (i.e., ISI 2s), les performances à la tâche auditive ont été moindre avec le co-travailleur cobot qu'avec le co-travailleur humain. Cela semble indiquer une allocation des ressources attentionnelles plus importante avec le cobot pour réaliser une seconde tâche plus difficile. Pour résumer, les résultats de l'Etude 1 semblent témoigner d'une charge cognitive plus importante pour les participants face au co-travailleur cobot que face au co-travailleur humain indiquant une tâche motrice plus difficile à réaliser face au cobot (Beauchet et al., 2005 ; Patel et al., 2014). Ceci était visible uniquement lorsque la charge cognitive supplémentaire était devenue trop importante pour les participants.

En revanche, dans l'Etude 2, les performances à la tâche auditive se dégradait avec l'augmentation de la cadence imposée. En fait, la demande attentionnelle de la tâche motrice croissait avec la cadence imposée par le cobot. Les participants ont donc alloué davantage de ressources attentionnelles pour essayer de maintenir la performance à la tâche motrice qui devenait de plus en plus difficile pour les participants (Beauchet et al., 2005 ; Patel et al., 2014). Cela n'a pas été suffisant pour maintenir l'efficacité de production. Les participants n'avaient plus suffisamment de ressources attentionnelles pour réaliser les deux tâches lorsque la cadence imposée dépassait leurs capacités. Le fait de mener ou de suivre la cadence dans l'Etude 2 n'a pas semblé avoir influencé la demande attentionnelle des participants.

De plus, la cadence imposée la plus rapide dans l'Etude 2 (i.e., AUTO-FAST) était moins importante que la cadence avec le co-travailleur humain dans l'Etude 1 (i.e., HUM) et la cadence imposée moyenne de l'Etude 2 (i.e., AUTO-MEAN) correspondait à la cadence avec le co-travailleur cobot de l'Etude 1 (i.e., COB). Ainsi, dans l'Etude 1, le co-travailleur semblait être le facteur de l'augmentation de la demande attentionnelle lors de la tâche motrice, et non pas la cadence. Au contraire, la demande diminuait avec la plus forte cadence. En revanche, dans l'Etude 2 la cadence de production imposée par le cobot a été un facteur d'augmentation de la demande attentionnelle.

Par conséquent, les résultats des deux Etudes ont montré que la demande attentionnelle des participants s'est accrue avec une dégradation de la production à la tâche motrice en travaillant avec un cobot et à une cadence de production trop importante, au-delà des capacités des participants. D'ailleurs, il a été observé dans l'Etude 2 que la charge de travail, mesurée par le NASA-TLX, avait augmenté avec la cadence imposée. Ce sont principalement l'exigence mentale et l'exigence temporelle qui sont devenues plus importantes pour les participants : l'exigence temporelle du fait de la cadence plus importante donc des fenêtres temporelles pour réaliser leurs sous-tâches moins longues ; l'exigence mentale confirmant donc l'augmentation de la charge cognitive du participant également visible par la baisse des performances à la seconde tâche. Cependant, la charge de travail perçue n'a pas été mesurée lors de l'Etude 1. Cela laisse donc sans réponse question d'une potentielle différence de charge de travail perçue entre les deux co-travailleurs. En sachant que la cadence de production était moins rapide face au co-travailleur cobot en comparaison à celle avec le co-travailleur humain, l'exigence temporelle pourrait être diminuée. Mais qu'en serait-il des autres dimensions et de la charge de

travail globale ? Il serait intéressant de mesurer cette charge de travail face aux deux différents co-travailleurs dans de prochaines études.

7.2 Une situation de travail inspirée de conditions écologiques, mais en laboratoire

Comme discuté dans les deux Etudes, cette situation de travail collaborative avec un cobot est certes inspirée d'éléments qui peuvent être retrouvés dans des conditions écologiques (i.e., sur des lignes d'assemblage), mais les expérimentations ont eu lieu en laboratoire. Une autre limite abordée précédemment de la situation collaborative est le cobot, qui a montré certaines limites pour la production. De plus, seul le YuMi cobot du groupe ABB a été utilisé ici, ne permettant pas forcément de généraliser nos résultats à l'ensemble des tâches collaboratives entre un humain et un cobot.

7.2.1 Le cobot : un cobot parmi les nombreux cobots

Pour les deux études, le cobot utilisé est le YuMi du groupe ABB. D'après Fournier et ses collaborateurs (2022), ce cobot est l'un des robots les plus collaboratifs actuellement sur le marché du fait de sa haute sécurité incluse dans sa conception pour que les opérateurs humains puissent travailler en toute sécurité dans un environnement partagé. Ainsi, il est possible d'observer davantage de collaboration directe entre les deux travailleurs d'un système hybride avec ce cobot qu'avec d'autres cobots dans cette tâche d'assemblage.

Ce cobot est composé de deux bras indépendants qui lui permettent d'exécuter deux sous-tâches en simultané (e.g., évacuation du produit fini et déplacement du carénage sur le socle central), comme un co-travailleur humain pourrait le faire. Ces caractéristiques permettent d'accélérer le processus de fabrication par rapport à un cobot à un seul bras articulé. En revanche, le poids mobilisable par chaque bras du cobot est relativement faible (environ 500g), limitant les actions potentielles du cobot. Il n'est donc pas possible d'effectuer des tâches de co-manipulations d'objets lourds.

Durant les expérimentations, une autre limite a pu être observée : les problèmes d'utilisation du cobot. En effet, au total, un nombre assez conséquent d'essais ont dû être arrêtés en raison de

problèmes techniques liés au cobot, puis recommencés, voire annulés lorsque les problèmes se sont répétés pour éviter un nombre trop important de répétitions du même essai (chaque essai ne pouvait être recommencé qu'une seule fois). Dans l'Etude 1, 8 essais sur 204 avec le co-travailleur cobot (soit 3,4%) ont dû être annulés et 41 (soit 20,6%) ont été recommencés tandis que dans l'Etude 2, 7 essais sur 240 (soit 3,3%) ont dû être annulés et 41 (soit 17,1%) ont été recommencés. Ces problèmes techniques peuvent résulter d'un manque de connaissance des examinateurs au sujet de l'utilisation de cette technologie malgré une auto-formation à son utilisation et à sa programmation. Cette dernière avait été réalisée dans le but d'utiliser le cobot et de résoudre les différents problèmes rencontrés lors des pré-manips, mais aussi en raison d'une technologie cobotique présentant quelques défaillances. Parmi les problèmes rencontrés, il a été observé à plusieurs reprises des problèmes de répétabilité dans les mouvements du cobot avec un décalage du référentiel de la position du bras et des pinces du cobot dans l'espace, certes minime mais suffisamment conséquent pour arrêter le cobot qui se bloquait alors pour la sécurité de l'opérateur.

Les résultats de l'Etude 1 ont également montré que le co-travailleur cobot était plus lent pour effectuer une de ses actions que le co-travailleur humain, impliquant une productivité moins importante pour le système hybride que pour le système humain. Cette vitesse moindre met en évidence des limites technologiques du cobot notamment dues aux différentes normes de sécurité imposées. En effet, la vitesse de mouvement d'un cobot ne doit pas excéder 1,5m/s, limitant donc les possibilités de rapidité du cobot dans l'exécution de ses gestes. Sa sécurité intrinsèque (e.g., se mettre à l'arrêt en cas de contact avec l'opérateur humain) limite également les interactions de haut niveau possibles entre les travailleurs, limitant par conséquent la productivité du système hybride.

Comme dit précédemment, seul un type de cobot a été utilisé dans les deux études. Dans la littérature, certains systèmes hybrides évalués étaient composés du cobot YuMi et d'autres systèmes hybrides évalués étaient composés d'autres types de cobots tels que l'UR3 (Mariscal et al., 2020), l'UR5 (Bernar et al., 2023) ou l'UR10e (Colim et al., 2021). Certains cobots peuvent donc effectuer différentes tâches que d'autres ne peuvent pas exécuter, comme des tâches de co-manipulation d'objets lourds, permettant de réduire la charge de l'opérateur dans l'exécution de ses tâches. De plus, les cobots peuvent être équipés de certains capteurs supplémentaires (e.g., capteur de force, caméra) permettant d'augmenter la communication non verbale et d'améliorer les interactions entre l'humain et le cobot (Faccio et al., 2023).

Finalement, nos études ont évalué une situation de travail collaborative avec un cobot dans une situation d'assemblage d'un produit léger avec un type de cobot. Il n'est donc pas possible de généraliser nos résultats à l'ensemble des types de tâches en industrie, ni à l'ensemble des systèmes hybrides comportant un cobot. En revanche, la méthodologie d'évaluation de la situation de travail, en termes de productivité mais aussi de santé de l'opérateur peut être transposée à tous types de situation collaborative pour un système hybride.

7.2.2 La situation de travail : du laboratoire au terrain

La tâche motrice a été pensée pour être au plus proche d'une situation réelle. Cette tâche utilise les avantages de l'humain et du cobot : la perception, l'intelligence et la motricité fine de l'humain et la précision et la répétabilité du cobot (Tsarouchi et al., 2016). Certains gestes, comme l'insertion de l'écrou et le vissage ont pu être réalisés par l'humain grâce à sa dextérité fine, que le cobot utilisé ici ne pouvait pas réaliser. En plus de tirer parti des avantages des deux travailleurs, les interactions entre les deux ont été de haut niveau, permettant aux deux de travailler dans le même environnement, avec le même but sur le même produit (Hentout et al., 2019).

Dans le monde industriel, il existe d'autres types de tâches permettant des interactions entre un humain et un cobot (Lemonnier et al., 2023). Dans nos études, la tâche motrice correspond aux types de tâches présentes dans l'industrie (tâche d'assemblage) mais aussi à l'utilisation du cobot dans ces tâches (avec des interactions sur le même produit, tour à tour). Nos résultats peuvent être en partie dépendants de ces spécificités. Il serait donc intéressant d'observer les répercussions de l'introduction d'un cobot dans d'autres types de tâches (e.g., soudage, ponçage, déplacements de produits) et dans d'autres types d'interaction (e.g., sur une pièce différente l'un après l'autre, charger en pièces le cobot).

Les participants ne correspondent pas à une population dite représentative des situations de travail dans les usines. Ici, nous avons fait le choix d'effectuer les deux études avec une population jeune, principalement estudiantine, avec aucune expérience ni dans le travail d'usinage ni avec un cobot. Une population d'opérateurs aurait été très différente à recruter sans budget, et très difficile à contrôler en termes d'expériences avec un cobot ou avec la tâche. En effet, au total les deux études additionnées comptent cinquante-quatre participants (quarante-

huit personnes dont six ayant participé aux deux études). Ce choix a permis une homogénéisation de la population étudiée sans biais liés à l'expérience du travail avec un cobot ou liés à la santé des opérateurs antérieure à la réalisation de l'étude. En effet, les stratégies de posture peuvent être différents avec des douleurs en amont (Maurice et al., 2018).

Le fait de choisir des participants débutants dans la réalisation de cette tâche a également montré que celle-ci n'était pas pleinement automatisée par les participants. En effet, dans les deux études, il a été observé une amélioration des performances de production avec le temps. Dans l'Etude 1, la performance de production au cours du dernier essai face à chaque co-travailleur était plus importante que pour le premier ; dans l'Etude 2, la performance de production était meilleure lorsque la condition DM était la dernière condition réalisée par rapport à lorsqu'elle était la première. Le manque d'apprentissage et de maîtrise de la tâche n'a pas permis d'évaluer les répercussions du travail avec le cobot sur une tâche automatisée, donc les conséquences à long terme de l'introduction d'un cobot.

Ces échantillons peuvent donc constituer une limite des résultats des deux études, et il serait très intéressant de pouvoir effectuer des études similaires avec des opérateurs habitués au travail collaboratif avec un cobot. De plus, la jeune population étudiée ici est moins à risques de développer des TMS qu'une population d'opérateurs pouvant avoir entre 40 et 60 ans (L'Assurance Maladie, 2021).

De plus, la population étudiée ici n'avait pas les mêmes enjeux qu'un réel opérateur pour l'introduction d'un cobot. En effet, dans l'article de Maurice et ses collaborateurs en 2018, les auteurs ont comparé un groupe dit de « non-travailleurs » et un groupe dit de « travailleurs en usine » concernant les arguments en faveur de l'utilisation des cobots en usine et ceux contre. Ainsi, les attentes et inquiétudes de l'introduction d'un cobot dans un poste de travail peuvent modifier les comportements du travailleur (Maurice et al., 2018). Ces interrogations renvoient aux questions d'acceptabilité et d'acceptation du cobot par les opérateurs, dans les chaînes de production (Bernar et al., 2023).

L'étude de la posture des participants avait pour but de quantifier les risques d'apparition de TMS en réalisant la tâche collaborative. Or les TMS apparaissent à long terme, avec la répétitivité de gestes dans des postures dites à risques (Uguen et al., 2018). Les analyses se sont faites sur des durées relativement courtes : les participants effectuaient la tâche motrice pendant moins d'une heure avec le cobot par étude. Les résultats ici sur la posture donnent donc des

informations sur les risques d'apparition de TMS si l'opérateur humain travaille de manière répétée dans ces postures sur de longues durées (des journées entières, plusieurs jours par semaine pendant plusieurs semaines). D'ailleurs, la fatigue est aussi la cause de nombreux effets négatifs sur l'opérateur avec une réduction des performances physiques et cognitives (Murray & Thimgan, 2016) mais aussi sur la production avec une augmentation de la probabilité d'erreurs humaines engendrant des erreurs dans la production (Givi et al., 2015). Or, les effets de la fatigue dans ce travail collaboratif n'ont pas été mesurés, en regard de la faible durée de travail des participants.

Il pourrait donc être intéressant d'observer l'influence du travail en interaction avec un cobot lors de la réalisation d'une tâche automatisée par de réels opérateurs sur les performances de production, et les répercussions sur la santé de ceux-ci, pendant une durée plus longue. Cela pourrait faire l'objet d'une perspective qui suivrait ce travail de thèse : mener une étude de terrain dans une usine déjà équipé d'un cobot.

7.3 Recommandations pour l'introduction d'un cobot dans une situation de travail collaboratif

Nous avons étudié une situation particulière avec un cobot en particulier. Nos résultats ne peuvent donc pas être généralisés à l'ensemble des tâches collaboratives ni à l'ensemble des collaborations avec un cobot.

Nous pouvons distinguer deux introductions de cobot dans une tâche : d'une part l'introduction du cobot dans une tâche pour la rendre collaborative (passage d'une tâche individuelle à une tâche collaborative) ; d'autre part l'introduction du cobot dans une tâche déjà collaborative (co-travailleur devient un cobot). Dans ces deux situations, l'adaptation de l'opérateur ne sera pas la même, notamment pour la répartition des tâches entre les deux travailleurs.

Dans la littérature, dans un contexte de tâche d'assemblage, les répercussions de l'introduction d'un cobot dans cette tâche pour la rendre collaborative ont été étudiées à plusieurs reprises, ne montrant aucune dégradation de la performance de production et révélant une diminution des risques pour la santé de l'opérateur (Colim et al., 2021 ; Gualtieri et al., 2020). Cette introduction a donc pour but d'au moins maintenir la productivité tout en améliorant la santé de l'opérateur. Cependant, le nouveau poste de travail (désormais collaboratif) a été pensé pour

que l'introduction du cobot n'influence pas négativement ni la production ni la santé de l'opérateur. Cela peut indiquer que seul le passage à une situation collaborative a permis ce bénéfice pour l'opérateur, et non le fait que le co-travailleur soit un cobot.

Dans le cadre du deuxième cas d'introduction d'un cobot, comme dans l'Etude 1 ici, cette situation n'avait pas encore été étudiée en tenant compte de la production et de la santé des opérateurs, avant ce travail de thèse. Ce deuxième cas a pour but de déplacer un des opérateurs sur un autre poste de travail ou de le mettre sur une nouvelle ligne de montage dans le but d'accroître la production (Realyvásquez-Vargas et al., 2019). Cependant, dans l'Etude 1, malgré une diminution des risques pour la santé de l'opérateur, la productivité a été réduite.

Ainsi, plusieurs points sont à prendre en compte avant d'introduire un cobot dans une situation de travail, notamment les répercussions sur la productivité et les répercussions sur les opérateurs. Récemment, Cardoso et ses collaborateurs (2021) ont indiqué qu'il n'existait pas de consensus sur les méthodes d'évaluation d'une HRI. Dans ce présent travail de thèse, nous avons souhaité amorcer une réflexion pour évaluer une HRI dans un ensemble plus vaste : la production, l'ergonomie physique et l'ergonomie cognitive.

7.3.1 Introduire un cobot pour une production efficiente...

L'introduction d'un cobot dans une usine n'a pas pour but de réduire la productivité de celle-ci. Au contraire, les cobots, qui se veulent plus flexibles, permettraient une plus grande variété de production sans diminution de cette productivité.

Cependant, nous avons vu dans l'Etude 1 que l'introduction d'un cobot pouvait diminuer cette productivité. Il est donc important de prendre en compte les caractéristiques du cobot, notamment celles liées à la sécurité, qui pourraient freiner cette production. Nous avons pu voir dans certaines études que l'introduction d'un cobot doit être pensée pour obtenir une répartition des tâches entre chacun, dans le but de conserver une production similaire, voire de l'augmenter. En effet, un travail standardisé définit la répartition des tâches entre chacun ainsi que le séquençage spatio-temporel de celles-ci, permettant d'optimiser le processus de production tout en réduisant les gaspillages (Mor et al., 2019 ; Realyvásquez-Vargas et al., 2019). La standardisation du travail améliore la fluidité des interactions entre l'humain et le cobot (i.e., diminution des temps morts au profit de davantage de collaboration), réduisant ainsi

les temps de cycle et augmentant la productivité du poste de travail (Nallusamy, 2016 ; Realyvásquez-Vargas et al., 2019).

Ainsi, il semble important d'étudier les interactions entre l'opérateur et le cobot pour utiliser de manière optimale les deux ressources. En plus d'une production moindre lorsque les interactions ne sont pas fluides, la perception du cobot par l'opérateur pourrait être mauvaise, conduisant à une diminution de l'acceptation de cette technologie.

Pour résumer, l'introduction d'un cobot dans une tâche a pour objectif de rendre la production plus flexible sans la diminuer. Il est donc important d'étudier l'impact de cette introduction sur les interactions entre l'opérateur humain et le cobot qui pourrait affecter la production.

7.3.2 ... sans mettre en danger la santé de l'opérateur

La production est un point majeur pour une entreprise d'un point de vue financier. Cependant, la santé des opérateurs constitue également un point majeur, y compris pour les entreprises, pour le fonctionnement de leurs usines. En effet, l'absence d'opérateurs qualifiés en raison de problèmes de santé affecte indirectement la production, et influence donc l'économie de l'entreprise.

Penser à la santé des opérateurs par l'ergonomie des postes de travail constitue une réflexion majeure au sein des entreprises. L'introduction du cobot va nécessairement modifier la tâche pour l'opérateur, ce qui pourrait se répercuter sur leur santé, sur le plan physique, mais aussi sur les plans cognitif et psychosocial (Brun & Wioland, 2021 ; Cardoso et al., 2021).

L'opérateur est donc à considérer dans sa globalité pour introduire un cobot dans sa tâche. Avant tout, il est important d'étudier au préalable son acceptabilité vis-à-vis de la technologie avec laquelle il est amené à travailler. Ce facteur psychosocial est à prendre en compte en amont, car une mauvaise acceptabilité peut amener un manque d'engagement de l'opérateur dans la collaboration avec le cobot, ce qui serait délétère pour le travail collaboratif. Cela est d'autant plus important que des moyens existent pour améliorer l'acceptabilité (e.g., implication des opérateurs dans les prises de décision, formation spécifique, groupes de réflexion ...), et ainsi augmenter l'engagement à terme des opérateurs si la question a été traitée

suffisamment tôt dans le processus. Ensuite, l'introduction du cobot peut modifier la répartition des actions à effectuer par l'opérateur.

Lorsque la tâche devient collaborative, l'opérateur passe de 100% des actions à effectuer à un pourcentage moindre. La question du choix de ces actions à réaliser par le cobot peut s'effectuer selon les possibilités techniques du cobot, selon les tâches avec de fortes contraintes biomécaniques sur l'opérateur (e.g., poids importants, fortes sollicitations au niveau des articulations) tout en pensant à la fluidité des interactions entre les deux. Lorsqu'une situation est déjà collaborative entre deux humains, le remplacement du co-travailleur humain peut amener à deux situations pour la tâche : conserver la même répartition des tâches ou modifier cette répartition en l'adaptant aux capacités du cobot. Pour ces deux situations, il est important d'avoir la même réflexion sur la répartition des tâches que lorsque la tâche devient collaborative.

Sur le plan physique, l'introduction d'un cobot peut modifier la posture et la gestuelle de l'opérateur. Ces changements pourraient amener une plus grande fatigue physique pouvant entraîner à long terme des nouveaux TMS ou des déplacements de TMS. Avant d'introduire le cobot, il est important de quantifier ces changements sur l'opérateur. Cette évaluation peut se faire sur le plan biomécanique avec l'utilisation de motion capture pour étudier les répercussions sur ses articulations, mais aussi sur le plan physiologique avec de l'EMG pour étudier les répercussions musculaires. Biomécaniquement, il existe plusieurs méthodes d'évaluations des risques de TMS selon la tâche pour observer les postures à risques, et les articulations les plus sollicitées. Physiologiquement, l'EMG peut renseigner sur les modifications de force à utiliser pour effectuer la tâche mais aussi sur la fatigue musculaire qui pourrait amener à long terme des modifications de la posture et ainsi des TMS.

Sur le plan cognitif, travailler avec un cobot est différent en plusieurs points par rapport à un travail avec un humain ou seul. Premièrement, la communication entre l'opérateur et un cobot est différente d'une communication entre deux humains. Les communications verbale et non verbale sont dépendantes des capacités du cobot. La communication verbale est forcément moindre, voire inexistante entre un humain et un cobot qu'entre deux humains, les deux pouvant échanger moins d'informations sur leurs tâches, mais aussi pouvant moins discuter pendant le travail. Or échanger au travail a un aspect positif sur le plan mental de l'opérateur. La communication non verbale (i.e., regards, gestes ou interfaces) dépend des capacités de

traitement du cobot, tandis que l'opérateur humain peut capter et traiter ces informations. Deuxièmement, l'attention de l'opérateur humain peut différer lorsqu'il travaille avec un cobot. En effet, selon son degré de confiance accordée au cobot, il pourrait lui porter plus d'attention au cobot, notamment par peur, ou inversement en porter moins en raison d'un biais d'automatisation. Troisièmement, les charges de travail peuvent également être modifiées par l'introduction du cobot avec tous les changements apportés à la tâche qu'il implique. Enfin, le stress de travailler face à un cobot peut engendrer une augmentation des erreurs de la part de l'opérateur ou une dégradation de certains paramètres physiques. Il existe de nombreux outils pour évaluer ce stress tels que l'ECG ou les GSR.

Pour résumer, préserver la santé de l'opérateur lors de l'introduction d'un cobot est primordial, et pas nécessairement évident, pour une bonne collaboration avec l'opérateur humain. Avant l'étape d'introduction du cobot et la possible redistribution des tâches, il est nécessaire de prendre en compte l'acceptabilité du cobot par les opérateurs, puis de valider ergonomiquement le nouveau poste de travail de l'opérateur en étudiant les répercussions de cette introduction sur les plans physique et cognitif.

8 CONCLUSION GENENRALE

Ce travail de thèse s'est inscrit dans un contexte d'introduction d'un cobot dans une situation de travail déjà collaborative. L'Etude 1 avait pour but d'analyser les différences entre un système humain et un système hybride humain-cobot. Pour cela, une même situation de travail a été étudiée du point de vue de la production, des interactions entre l'opérateur humain et son co-travailleur, de la posture de l'opérateur, de la quantité de ses ressources attentionnelles disponibles ainsi que de son attention visuelle. Malgré une production moindre pour le système hybride et une dégradation des interactions entre ses deux travailleurs par rapport au système humain, la posture de l'opérateur humain était moins à risques de développer des TMS lorsqu'il travaillait face au cobot. Les ressources attentionnelles disponibles ne différaient pas selon le co-travailleur malgré la diminution de production, tandis que les comportements oculomoteurs étaient différents avec une exploration visuelle plus intense face au cobot. La production moins importante lors de la collaboration humain-cobot pouvait s'expliquer par deux facteurs. D'une part, les caractéristiques du cobot utilisées dans cette étude ont limité les participants dans la réalisation de leur tâche, car ils devaient attendre la fin de l'action du cobot pour réaliser leur

tâche. D'autre part, la répartition des tâches entre l'opérateur humain et son co-travailleur était similaire que ce soit avec le cobot ou avec l'autre humain. Cette répartition n'a pas été repensée pour optimiser les interactions entre l'humain et le cobot.

La posture semblait donc être moins à risques lorsque l'opérateur travaillait avec un cobot qu'avec un autre humain. Cependant, l'amélioration de cette posture pouvait également être liée à la diminution de la production, donc à la cadence. Ainsi, l'Etude 2 avait pour but d'analyser les effets du rythme et du meneur de la cadence sur la production, les interactions entre l'humain et le cobot, la posture de l'opérateur, sa charge de travail perçue et son stress. Cette étude a montré que la productivité pouvait être dégradée par une cadence imposée par le cobot trop importante lorsque celle-ci dépassait les capacités de l'opérateur. Cette cadence réduisait également ses ressources attentionnelles disponibles. La posture se dégradait et la charge de travail perçue croissait avec l'augmentation de la cadence imposée tandis que les interactions entre l'opérateur et le cobot devenaient de plus en plus fluides. Mener la cadence ou la suivre ne semblait pas influencer ces différentes variables. En fait, le rythme de la cadence était le seul facteur qui influençait ces paramètres.

Ainsi, les deux études de ce travail de thèse ont montré que dans cette situation collaborative avec ce cobot, l'opérateur humain s'est adapté au cobot dans la réalisation de sa tâche. Cette adaptation est, au moins en partie, liée à la réduction de la cadence imposée et aux capacités limitées du cobot à son poste.

Cependant, chaque situation de travail collaborative est différente. En effet, la situation de travail dépend des travailleurs qui y contribuent (nombre d'humains et de cobots), des caractéristiques du cobot, des actions motrices et mentales à effectuer (tâches), de la cadence (libre ou imposée), de la durée de la tâche (courte ou longue période) et des adaptations mises en place (e.g., analyse ergonomique du poste avant l'introduction du cobot ou non). Pour une même situation de travail, les répercussions sur l'opérateur diffèrent de l'un à l'autre selon de nombreuses caractéristiques liées à l'individu (e.g., taille, âge, capacités physiques et mentales). Avant d'introduire un cobot dans une situation de travail, il est donc important d'étudier les répercussions de cette nouvelle tâche sur la production et sur l'opérateur. De plus, savoir si ajouter un cobot à un poste de travail donné est bénéfique, tant sur la productivité que sur la santé de l'opérateur, n'est pas chose facile et va dépendre de tous les paramètres cités précédemment.

Bibliographie

- Adams, J. A. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111–150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Ahern, S., & Beatty, J. (1979). Pupillary Responses During Information Processing Vary with Scholastic Aptitude Test Scores. *Science*, 205(4412), 1289–1292. <https://doi.org/10.1126/science.472746>
- Alexander, N. B. (1994). Postural Control in Older Adults. *Journal of the American Geriatrics Society*, 42(1), 93–108. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.1994.tb06081.x>
- Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., & Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 35(3), 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>
- Ardestani, M. M., Kinnaird, C. R., Henderson, C. E., & Hornby, T. G. (2019). Compensation or Recovery? Altered Kinetics and Neuromuscular Synergies Following High-Intensity Stepping Training Poststroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 33(1), 47–58. <https://doi.org/10.1177/1545968318817825>
- Atain-Kouadio, J.-J., & Sghaier, A. (2017). *Les robots et dispositifs d'assistance physique: État des lieux et enjeux pour la prévention* (Notes Scientifiques et Techniques 354; pp. 1–49). Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01808404/>
- Atkinson, J. W. (1964). *An introduction to motivation*. Van Nostrand.
- Aublet-Cuvelier, A., Ha, C., Roquelaure, Y., d'Escantha, A., Meyer, J. P., Sluiter, J., Frings-Dresen, M., & Rest, K. (2010). *Protocole d'examen clinique pour le remérage des troubles musculosquelettiques du membre supérieur, adaptation française du consensus européen SALTSA* (Vol. 54).
- Aubry, K. (2006). *Mise à l'essai en situation réelle de différentes méthodes d'évaluation de l'exposition aux facteurs de risque de troubles musculosquelettiques*. Université de Montréal.
- Audley, R. J., Rouse, W., Senders, J., & Sheridan, T. (1979). Final report of mathematical modelling group. In D. Moray (Ed.), *Mental workload: Its theory and measurement*. Plenum Press.
- Awh, E., Belopolsky, A. V., & Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(8), 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.06.010>

- Baddeley, A. (1986). *Working memory* (Oxford University Press).
- Baddeley, A., Della Sala, S., Papagno, C., & Spinnler, H. (1997). Dual-task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology*, *11*(2), 187–194.
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, *109*, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
- Bandura, A. (1986). *Social foundations of thought and action*. Prentice-Hall.
- Bao, S. S., Kapellusch, J. M., Merryweather, A. S., Thiese, M. S., Garg, A., Hegmann, K. T., & Silverstein, B. A. (2016). Relationships between job organisational factors, biomechanical and psychosocial exposures. *Ergonomics*, *59*(2), 179–194. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1065347>
- Baraglia, J., Cakmak, M., Nagai, Y., Rao, R., & Asada, M. (2016). Initiative in robot assistance during collaborative task execution. *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 67–74. <https://doi.org/10.1109/HRI.2016.7451735>
- Bardy, B. (1991). Le paradigme de la double tâche. Intérêts pour le champ des habiletés motrices complexes. *Science et Motricité*, *15*, 31–39.
- Barz, M., Kapp, S., Kuhn, J., & Sonntag, D. (2021). Automatic Recognition and Augmentation of Attended Objects in Real-time using Eye Tracking and a Head-mounted Display. *ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, 1–4. <https://doi.org/10.1145/3450341.3458766>
- Bayot, M., Dujardin, K., Tard, C., Defebvre, L., Bonnet, C. T., Allart, E., & Delval, A. (2018). The interaction between cognition and motor control: A theoretical framework for dual-task interference effects on posture, gait initiation, gait and turning. *Neurophysiologie Clinique*, *48*(6), 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2018.10.003>
- Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. In *Handbook of psychophysiology* (Vol. 2, pp. 142–162).
- Beauchet, O., Dubost, V., Herrmann, F. R., & Kressig, R. W. (2005). Stride-to-stride variability while backward counting among healthy young adults. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *2*(1), 26. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-26>
- Ben Youssef, A., Varni, G., Essid, S., & Clavel, C. (2019). On-the-fly detection of user engagement decrease in spontaneous Human-Robot Interaction. *International Journal of Social Robotics*, *11*(5), 815–828. <https://doi.org/10.1007/s12369-019-00591-2>

- Bengler, K., Zimmermann, M., Bortot, D., Kienle, M., & Damböck, D. (2012). Interaction principles for cooperative human-machine systems. *It - Information Technology*, 54(4), 157–164. <https://doi.org/10.1524/itit.2012.0680>
- Bernar, A., Prevot, C., Legardeur, J., & Chanal, H. (2023). Comment favoriser la transition vers l'industrie 4.0 dans le secteur textile-habillement: Étude de cas du déploiement d'un cobot au sein de l'entreprise Petit Bateau. *18ème Colloque national S.mart*.
- Bernard, B. P., & Putz-Anderson, V. (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors. A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. (97B141). U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. <https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB97141>
- Berthoz, A., & Petit, J.-L. (2014). L'incompressible complexité du réel et la construction évolutive du simple. In *Complexité-Simplexité*. Collège de France. <https://doi.org/10.4000/books.cdf.3363>
- Besharati, A., Daneshmandi, H., Zareh, K., Fakherpour, A., & Zoaktafi, M. (2020). Work-related musculoskeletal problems and associated factors among office workers. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(3), 632–638. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1501238>
- Bherer, L., Kramer, A. F., Peterson, M. S., Colcombe, S., Erickson, K., & Becic, E. (2005). Training effects on dual-task performance: Are there age-related differences in plasticity of attentional control? *Psychology and Aging*, 20(4), 695–709. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.20.4.695>
- Bi, L., Feleke, A., & Guan, C. (2019). A review on EMG-based motor intention prediction of continuous human upper limb motion for human-robot collaboration. *Biomedical Signal Processing and Control*, 51, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.02.011>
- Bicchi, A., Peshkin, M. A., & Colgate, J. E. (2008). Safety for physical human-robot interaction. In *Springer handbook of robotics* (Springer, pp. 1335–1348).
- Bidet-Mayer, T. (2017). *L'industrie du futur: Une compétition mondiale*. Presses des Mines.
- Bishnoi, A., & Hernandez, M. E. (2021). Dual task walking costs in older adults with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Aging & Mental Health*, 25(9), 1618–1629. <https://doi.org/10.1080/13607863.2020.1802576>
- Bisio, A., Sciutti, A., Nori, F., Metta, G., Fadiga, L., Sandini, G., & Pozzo, T. (2014). Motor contagion during Human-Human and Human-robot interaction. *PLoS ONE*, 9(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106172>

- Bisio, A., Stucchi, N., Jacono, M., Fadiga, L., & Pozzo, T. (2010). Automatic versus voluntary motor imitation: Effect of visual context and stimulus velocity. *PLoS ONE*, 5(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013506>
- Bo, H., Dhanya Menoth Mohan, Muhammad Azhar, Kana Sreekanth, & Domenico Campolo. (2016). Human-robot collaboration for tooling path guidance. *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 1340–1345. <https://doi.org/10.1109/BIOROB.2016.7523818>
- Bobillier-Chaumon, M.-E. (2013). *Conditions d'usage et facteurs d'acceptation des technologies dans l'activité: Questions et perspectives pour la psychologie au travail*. Université Lyon 2.
- Bobillier-Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité: Premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22(1), 4–21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>
- Bongers, P. M., Ijmker, S., van den Heuvel, S., & Blatter, B. M. (2006). Epidemiology of work related neck and upper limb problems: Psychosocial and personal risk factors (Part I) and effective interventions from a bio behavioural perspective (Part II). *Journal of Occupational Rehabilitation*, 16(3), 272–295. <https://doi.org/10.1007/s10926-006-9044-1>
- Borg, G. (1990). Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 16, 55–58. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1815>
- Bortot, D. (2014). *Ergonomic human-robot coexistence in the branch of production* [PhD Thesis, Technische Universität München]. https://mediatum.ub.tum.de/1177024?style=full_standard
- Boutet, D. (2008). Une morphologie de la gestualité: Structuration articulaire. *Cahiers de linguistiques anatomiques*, 5, 81–115.
- Brand-D'Abrescia, M., & Lavie, N. (2008). Task coordination between and within sensory modalities: Effects on distraction. *Perception & Psychophysics*, 70(3), 508–515. <https://doi.org/10.3758/PP.70.3.508>
- Broadbent, D. E. (1958). *Perception and communication*. Oxford: Pergamon Press.
- Brownstone, R. M., Jordan, L. M., Kriellaars, D. J., Noga, B. R., & Shefchyk, S. J. (1992). On the regulation of repetitive firing of lumbar motoneurons during fictive locomotion in the cat. *Experimental Brain Research*, 90(3), 441–455.
- Brun, L., & Wioland, L. (2021). Prevention of Occupational Risks Related to the Human-Robot Collaboration. In T. Ahram, R. Taiar, K. Langlois, & A. Choplin (Eds.), *Human*

- Interaction, Emerging Technologies and Future Applications III* (Vol. 1253, pp. 441–446). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55307-4_67
- Caporaso, T., Di Gironimo, G., Tarallo, A., De Martino, G., Di Ludovico, M., & Lanzotti, A. (2017). Digital human models for gait analysis: Experimental validation of static force analysis tools under dynamic conditions. In *Advances on mechanics, design engineering and manufacturing* (pp. 479–488). Springer.
- Caporaso, T., Grazioso, S., Panariello, D., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2020). Understanding the Human Motor Control for User-Centered Design of Custom Wearable Systems: Case Studies in Sports, Industry, Rehabilitation. In C. Rizzi, A. O. Andrisano, F. Leali, F. Gherardini, F. Pini, & A. Vergnano (Eds.), *Design Tools and Methods in Industrial Engineering* (pp. 753–764). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31154-4_64
- Cardoso, A., Colim, A., Bicho, E., Braga, A. C., Menozzi, M., & Arezes, P. (2021). Ergonomics and Human Factors as a Requirement to Implement Safer Collaborative Robotic Workstations: A Literature Review. *Safety*, 7(4), 71. <https://doi.org/10.3390/safety7040071>
- Caroly, S., Major, M.-E., Probst, I., & Molinié, A.-F. (2013). Le genre des troubles musculo-squelettiques: Interventions ergonomiques en France et au Canada. *Travail, genre et sociétés*, 29(1), 49–67. <https://doi.org/10.3917/tgs.029.0049>
- Cavuoto, L., & Megahed, F. (2016). Understanding fatigue and the implications for worker safety. *Professional Safety*, 16–19. <https://onepetro.org/ASSPPDCE/proceedings-abstract/ASSE16/All-ASSE16/ASSE-16-734/77206>
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. *5ème colloque de psychologie ergonomique (Epique)*, 28–30.
- Cesta, A., Orlandini, A., Bernardi, G., & Umbrico, A. (2016). Towards a planning-based framework for symbiotic human-robot collaboration. *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733585>
- Chaffin, D. B. (1973). Localized muscle fatigue—Definition and measurement. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 15(4), 346–354.
- Chaffin, D. B., Andersson, G. B., & Martin, B. J. (2006). *Occupational biomechanics* (Vol. 4). John Wiley & Sons, Inc.
- Charalambous, G., Fletcher, S., & Webb, P. (2016). Development of a Human Factors Roadmap for the Successful Implementation of Industrial Human-Robot Collaboration. In C. Schlick & S. Trzcieliński (Eds.), *Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing*

- the Enterprise of the Future* (Vol. 490, pp. 195–206). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-41697-7_18
- Charpentier, P., & Sghaier, A. (2013). L’homme au travail et le robot: Une relation à inventer. *Hygiène et Sécurité Du Travail*, 231, 84–88.
- Chica, A. B., Bartolomeo, P., & Lupiáñez, J. (2013). Two cognitive and neural systems for endogenous and exogenous spatial attention. *Behavioural Brain Research*, 237, 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.09.027>
- Chowdhury, R., Reaz, M., Ali, M., Bakar, A., Chellappan, K., & Chang, T. (2013). Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques. *Sensors*, 13(9), 12431–12466. <https://doi.org/10.3390/s130912431>
- Ciccarelli, M., Papetti, A., Scoccia, C., Menchi, G., Mostarda, L., Palmieri, G., & Germani, M. (2022). A system to improve the physical ergonomics in Human-Robot Collaboration. *Procedia Computer Science*, 200, 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.267>
- Claverie, B., Blanc, B. L., & Fouillat, P. (2013). La cobotique. La robotique soumise. *Communication et Organisation*, 44, 203–214.
- Cohen, M. A., Cavanagh, P., Chun, M. M., & Nakayama, K. (2012). The attentional requirements of consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(8), 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.06.013>
- Cohen, Y., Shoval, S., & Faccio, M. (2019). Strategic View on Cobot Deployment in Assembly 4.0 Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1519–1524. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.415>
- Colim, A., Faria, C., Cunha, J., Oliveira, J., Sousa, N., & Rocha, L. A. (2021). Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics. *Safety*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.3390/safety7010014>
- Collewet, M., & Sauermann, J. (2017). Working hours and productivity. *Labour Economics*, 47, 96–106.
- Colombini, D. (1998). An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1261–1289. <https://doi.org/10.1080/001401398186306>
- CUSSTR. (2005). *Aménagement général des postes de travail* (pp. 27–41) [Ergonomie]. Commission Universitaire de Sécurité et santé au Travail Romande (CUSSTR). <http://cusstr.ch/repository/10.pdf>

- d'Avella, A., Portone, A., & Lacquaniti, F. (2011). Superposition and modulation of muscle synergies for reaching in response to a change in target location. *Journal of Neurophysiology*, *106*(6), 2796–2812. <https://doi.org/10.1152/jn.00675.2010>
- Danion, F., & Marin, L. (2016). *Neurosciences comportementales: Contrôle du mouvement et apprentissage moteur* (2nd ed.). Ellipses.
- Darvishi, E., Maleki, A., Giahi, O., & Akbarzadeh, A. (2016). Subjective Mental Workload and Its Correlation With Musculoskeletal Disorders in Bank Staff. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, *39*(6), 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2016.05.003>
- de Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, *59*(5), 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- De Simone, V., Di Pasquale, V., Giubileo, V., & Miranda, S. (2022). Human-Robot Collaboration: An analysis of worker's performance. *Procedia Computer Science*, *200*, 1540–1549. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.355>
- Debaere, F., Swinnen, S. P., Béatse, E., Sunaert, S., Van Hecke, P., & Duysens, J. (2001). Brain Areas Involved in Interlimb Coordination: A Distributed Network. *NeuroImage*, *14*(5), 947–958. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0892>
- DeBeaumont, R., & Singell, L. D. (1999). The return to hours and workers in U.S. manufacturing: Evidence on aggregation bias. *Southern Economic Journal*, *66*(2), 336–352. <https://doi.org/10.1002/j.2325-8012.1999.tb00250.x>
- Dempsey, P. G., Mathiassen, S. E., Jackson, J. A., & O'Brien, N. V. (2010). Influence of three principles of pacing on the temporal organisation of work during cyclic assembly and disassembly tasks. *Ergonomics*, *53*(11), 1347–1358. <https://doi.org/10.1080/00140139.2010.520745>
- Deng, T., Yan, H., Qin, L., Ngo, T., & Manjunath, B. S. (2020). How Do Drivers Allocate Their Potential Attention? Driving Fixation Prediction via Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *21*(5), 2146–2154. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2915540>
- Dennis, A., Dawes, H., Elsworth, C., Collett, J., Howells, K., Wade, D. T., Izadi, H., & Cockburn, J. (2009). Fast walking under cognitive-motor interference conditions in chronic stroke. *Brain Research*, *1287*, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.06.023>
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*(1), 193–222.

- D'Esposito, M., Postle, B. R., Ballard, D., & Lease, J. (1999). Maintenance versus Manipulation of Information Held in Working Memory: An Event-Related fMRI Study. *Brain and Cognition*, *41*(1), 66–86. <https://doi.org/10.1006/brcg.1999.1096>
- Deutsch, A. J., & Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological Review*, *70*, 80–90.
- Di Stasi, L. L., Antolí, A., & Cañas, J. J. (2011). Main sequence: An index for detecting mental workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics*, *42*(6), 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.01.003>
- Di Stasi, L. L., Catena, A., Cañas, J. J., Macknik, S. L., & Martinez-Conde, S. (2013). Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *37*(5), 968–975. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.03.011>
- Di Stasi, L. L., Renner, R., Catena, A., Cañas, J. J., Velichkovsky, B. M., & Pannasch, S. (2012). Towards a driver fatigue test based on the saccadic main sequence: A partial validation by subjective report data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *21*(1), 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.07.002>
- Direction Générale des Entreprises. (2015). *Technologies clés: Préparer l'industrie du futur*.
- Doisy, G. (2012). Sensorless collision detection and control by physical interaction for wheeled mobile robots. *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction - HRI '12*, 121–122.
- Donchin, O., Francis, J. T., & Shadmehr, R. (2003). Quantifying Generalization from Trial-by-Trial Behavior of Adaptive Systems that Learn with Basis Functions: Theory and Experiments in Human Motor Control. *Journal of Neuroscience*, *23*(27), 9032–9045.
- Donchin, O., Gribova, A., Steinberg, O., Bergman, H., & Vaadia, E. (1998). Primary motor cortex is involved in bimanual coordination. *Nature*, *395*(6699), 274–278. <https://doi.org/10.1038/26220>
- Dreher, J.-C., & Grafman, J. (2003). Dissociating the Roles of the Rostral Anterior Cingulate and the Lateral Prefrontal Cortices in Performing Two Tasks Simultaneously or Successively. *Cerebral Cortex*, *13*(4), 329–339. <https://doi.org/10.1093/cercor/13.4.329>
- Dubost, V., Annweiler, C., Aminian, K., Najafi, B., Herrmann, F. R., & Beauchet, O. (2008). Stride-to-stride variability while enumerating animal names among healthy young adults: Result of stride velocity or effect of attention-demanding task? *Gait & Posture*, *27*(1), 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.03.011>
- Duchowski, A. T., Krejtz, K., Krejtz, I., Biele, C., Niedzielska, A., Kiefer, P., Raubal, M., & Giannopoulos, I. (2018). The Index of Pupillary Activity: Measuring Cognitive Load

- vis-à-vis Task Difficulty with Pupil Oscillation. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1145/3173574.3173856>
- Dugué, L., Merriam, E. P., Heeger, D. J., & Carrasco, M. (2018). *Differential impact of endogenous and exogenous attention on activity in human visual cortex* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/414508>
- Dzeng, R.-J., Lin, C.-T., & Fang, Y.-C. (2016). Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification. *Safety Science*, 82, 56–67.
- Edelman, J. A., Valenzuela, N., & Barton, J. J. S. (2006). Antisaccade velocity, but not latency, results from a lack of saccade visual guidance. *Vision Research*, 46(8–9), 1411–1421. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.09.013>
- El Makrini, I., Merckaert, K., Winter, J. D., Lefeber, D., & Vanderborght, B. (2019). Task allocation for improved ergonomics in Human-Robot Collaborative Assembly. *Interaction Studies. Social Behaviour and Communication in Biological and Artificial Systems*, 20(1), 102–133. <https://doi.org/10.1075/is.18018.mak>
- Elfeituri, F. E., & Taboun, S. M. (2002). An Evaluation of the NIOSH Lifting Equation: A Psychophysical and Biomechanical Investigation. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 8(2), 243–258. <https://doi.org/10.1080/10803548.2002.11076527>
- Ellis, C. A., Gibbs, S. J., & Rein, G. (1991). Groupware: Some issues and experiences. *Communications of the ACM*, 34(1), 39–58. <https://doi.org/10.1145/99977.99987>
- England, S. A., & Granata, K. P. (2007). The influence of gait speed on local dynamic stability of walking. *Gait & Posture*, 25(2), 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.03.003>
- Escorpizo, R., & Moore, A. (2007). The effects of cycle time on the physical demands of a repetitive pick-and-place task. *Applied Ergonomics*, 38(5), 609–615. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.06.009>
- Faccio, M., Granata, I., Menini, A., Milanese, M., Rossato, C., Bottin, M., Minto, R., Pluchino, P., Gamberini, L., Boschetti, G., & Rosati, G. (2023). Human factors in cobot era: A review of modern production systems features. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(1), 85–106. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01953-w>
- Fang, H. C., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2013). A novel augmented reality-based interface for robot path planning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 8(1), 33–42. <https://doi.org/10.1007/s12008-013-0191-2>

- Ferman, L., Collewyn, H., Jansen, T. C., & Van den Berg, A. V. (1987). Human gaze stability in the horizontal, vertical and torsional direction during voluntary head movements, evaluated with a three-dimensional scleral induction coil technique. *Vision Research*, 27(5), 811–828. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90078-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90078-2)
- Field, M., Pan, Z., Stirling, D., & Naghdy, F. (2011). Human motion capture sensors and analysis in robotics. *Industrial Robot: An International Journal*, 38(2), 163–171. <https://doi.org/10.1108/014399111111106372>
- Fournier, É., Kilgus, D., Landry, A., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H., & Jeoffrion, C. (2022). The Impacts of Human-Cobot Collaboration on Perceived Cognitive Load and Usability during an Industrial Task: An Exploratory Experiment. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 10(2), 83–90. <https://doi.org/10.1080/24725838.2022.2072021>
- Fowler, C. A., Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Shockley, K. D. (2008). Language Use, Coordination, and the Emergence of Cooperative Action. In A. Fuchs & V. K. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics* (pp. 261–279). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74479-5_13
- Frénette, B. (2013). *La vision et l'environnement de travail*. Les presses de l'Université de Montréal.
- Fryman, J., & Matthias, B. (2012). Safety of industrial robots: From conventional to collaborative applications. *ROBOTIK 2012; the German Conference on Robotics*, 1–5.
- Gage, W. H., Sleik, R. J., Polych, M. A., McKenzie, N. C., & Brown, L. A. (2003). The allocation of attention during locomotion is altered by anxiety. *Experimental Brain Research*, 150(3), 385–394. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1468-7>
- Galley, N. (1989). Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de)activation. A review and some speculations. *Journal of Psychophysiology*, 3, 229–244.
- Galley, N. (1993). The evaluation of the electrooculogram as a psychophysiological measuring instrument in the driver study of driver behaviour. *Ergonomics*, 36(9), 1063–1070. <https://doi.org/10.1080/00140139308967978>
- Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018). “Top-down” Does Not Mean “Voluntary”. *Journal of Cognition*, 1(1), 25. <https://doi.org/10.5334/joc.28>
- Genaidy, A. M., Al-Shedi, A. A., & Shell, R. L. (1993). Ergonomic risk assessment: Preliminary guidelines for analysis of repetition, force and posture. *Journal of Human Ergology*, 22, 45–55.

- Gianella, C., & Lagarde, P. (1999). *Productivity of hours in the aggregate production function: An evaluatino on a panel of French firms from the manufacturing sector* (9918; Document de Travail de l'INSEE). INSEE.
- Gilbert, J. (2009). The EndoAssist™ Robotic Camera Holder as an Aid to the Introduction of Laparoscopic Colorectal Surgery. *The Annals of The Royal College of Surgeons of England*, 91(5), 389–393. <https://doi.org/10.1308/003588409X392162>
- Girasa, R. (2020). *Artificial Intelligence as a Disruptive Technology: Economic Transformation and Government Regulation*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35975-1>
- Givi, Z. S., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*, 39(17), 5186–5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>
- Glagowski, T., Pedram, H., & Shamash, Y. (1992). Human factors in robot teach programming. In *Human-Robot Interaction* (Taylor&Francis, pp. 16–47).
- Godfroid, A., Ahn, J., Choi, I., Ballard, L., Cui, Y., Johnston, S., Lee, S., Sarkar, A., & Yoon, H.-J. (2018). Incidental vocabulary learning in a natural reading context: An eye-tracking study. *Bilingualism: Language and Cognition*, 21(3), 563–584. <https://doi.org/10.1017/S1366728917000219>
- Godijn, R., & Theeuwes, J. (2002). Programming of endogenous and exogenous saccades: Evidence for a competitive integration model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(5), 1039–1054. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.5.1039>
- Golden, L. (2012). The effects of working time on productivity and firm performance, research synthesis paper. *International Labor Organization (ILO) Conditions of Work and Employment Series*, 33.
- Gollac, M., & Volkoff, S. (2002). La mise au travail des stéréotypes de genre: Les conditions de travail des ouvrières. *Travail, genre et sociétés*, N° 8(2), 25. <https://doi.org/10.3917/tgs.008.0025>
- Gombolay, M., & Shah, J. A. (2014). *Challenges in Collaborative Scheduling of Human-Robot Teams*. AAAI Fall Symposium Series.
- Gómez-Galán, M., Pérez-Alonso, J., Callejón-Ferre, Á.-J., & López-Martínez, J. (2017). Musculoskeletal disorders: OWAS review. *INDUSTRIAL HEALTH*, 55(4), 314–337. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2016-0191>

- Goodrich, M. A., & Schultz, A. C. (2007). Human-Robot Interaction: A Survey. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 1(3), 203–275. <https://doi.org/10.1561/11000000005>
- Gooyers, C. E., & Stevenson, J. M. (2012). The impact of an increase in work rate on task demands for a simulated industrial hand tool assembly task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(1), 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.005>
- Grace, P. M., Stanford, T., Gentgall, M., & Rolan, P. E. (2010). Utility of saccadic eye movement analysis as an objective biomarker to detect the sedative interaction between opioids and sleep deprivation in opioid-naive and opioid-tolerant populations. *Journal of Psychopharmacology*, 24(11), 1631–1640. <https://doi.org/10.1177/0269881109352704>
- Gruber, O. (2011). Effects of domain-specific interference on brain activation associated with verbal working memory task performance. *Cerebral Cortex*, 11(11), 1047–1055. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.11.1047>
- Grzybowska, K. (2010). An OWAS-based analysis of storekeeper workloads. *Logistics and Transport*, 10(1), 57–63.
- Gualtieri, L., Monizza, G. P., Rauch, E., Vidoni, R., & Matt, D. T. (2020). From Design for Assembly to Design for Collaborative Assembly—Product Design Principles for Enhancing Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaboration. *Procedia CIRP*, 91, 546–552. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.212>
- Gualtieri, L., Palomba, I., Merati, F. A., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Design of Human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability*, 12(9), 3606–3628. <https://doi.org/10.3390/su12093606>
- Guignon, N. (2008). Risques professionnels: Les femmes sont-elles à l'abri? In *Femmes et hommes—Regards sur la parité* (2008th ed., pp. 51–63). INSEE.
- Habibi, E., Taheri, M. R., & Hasanzadeh, A. (2015). Relationship between mental workload and musculoskeletal disorders among Alzahra Hospital nurses. *Iranian Journal of Nursing and Midwifery Research*, 20(1), 6.
- Hagberg, M. (1981). Electromyographic signs of shoulder muscular fatigue in two elevated arm positions. *American Journal of Physical Medicine*, 60(3), 111–121.
- Hall, E. T., Birdwhistell, R. L., Bock, B., Diebold Jr, A. R., Durbin, M., & Vayda, A. P. (1968). Proxemics. *Current Anthropology*, 9(2), 83–108.
- Hancock, P. A., Billings, D. R., Schaefer, K. E., Chen, J. Y. C., De Visser, E. J., & Parasuraman, R. (2011). A Meta-Analysis of Factors Affecting Trust in Human-Robot Interaction.

- Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 53(5), 517–527. <https://doi.org/10.1177/0018720811417254>
- Harms-Ringdahl, K., & Schüldt, K. (1990). Neck and shoulder load and load-elicited pain in sitting work postures. In M. Bullock, *Ergonomics: The physiotherapist in the workplace* (Churchill-Livingstone, pp. 133–147).
- Hart, S. G. (2006). Nasa-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Sage, Vol. 50, pp. 904–908).
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Hayes, M. J., Cockrell, D., & Smith, D. R. (2009). A systematic review of musculoskeletal disorders among dental professionals. *International Journal of Dental Hygiene*, 7(3), 159–165. <https://doi.org/10.1111/j.1601-5037.2009.00395.x>
- Helms, E., Schraft, R. D., & Hagele, M. (2002). rob@work: Robot assistant in industrial environments. *Proceedings. 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 399–404. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2002.1045655>
- Henderson, J. (2003). Human gaze control during real-world scene perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 498–504. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.006>
- Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased Response Latency for Complicated Movements and A “Memory Drum” Theory of Neuromotor Reaction. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 31(3), 448–458. <https://doi.org/10.1080/10671188.1960.10762052>
- Hentout, A., Aouache, M., Maoudj, A., & Akli, I. (2019). Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: A literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33(15–16), Article 15–16. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- Herberts, P., Kadefors, R., & Broman, H. (1980). Arm positioning in manual tasks an electromyographic study of localized muscle fatigue. *Ergonomics*, 23(7), 655–665.
- Hernandez, G., Valles, D., Wierschem, D. C., Koldenhoven, R. M., Koutitas, G., Mendez, F. A., Aslan, S., & Jimenez, J. (2020). Machine Learning Techniques for Motion Analysis of Fatigue from Manual Material Handling Operations Using 3D Motion Capture Data. *2020 10th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 0300–0305. <https://doi.org/10.1109/CCWC47524.2020.9031222>
- Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143(3611), 1190–1192. <https://doi.org/10.1126/science.143.3611.1190>

- Hidalgo, J., Genaidy, A., Karwowski, W., Christensen, D., HusTON, R., & Stambough, J. (1995). A cross-validation of the NIOSH limits for manual lifting. *Ergonomics*, *38*(12), 2455–2464. <https://doi.org/10.1080/00140139508925279>
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, *31*(2), 201–205. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Hill, T. (2017). *Manufacturing strategy: The strategic management of the manufacturing function*. Macmillan International Higher Education.
- Hoffman, G. (2019). Evaluating fluency in human–robot collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *49*(3), 209–218. <https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2904558>
- Hoffman, G., & Breazal, C. (2007). Cost-based anticipatory action selection for human-robot fluency. *IEEE Transactions on Robotics*, *23*(5), 952–961. <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.907483>
- Hoogendoorn, W. E., van Poppel, M. N. M., Bongers, P. M., Koes, B. W., & Bouter, L. M. (2000). Systematic Review of Psychosocial Factors at Work and Private Life as Risk Factors for Back Pain: *Spine*, *25*(16), 2114–2125. <https://doi.org/10.1097/00007632-200008150-00017>
- Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H., & Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature Neuroscience*, *3*(3), 284–291. <https://doi.org/10.1038/72999>
- Howell, A. M., Kobayashi, T., Hayes, H. A., Foreman, K. B., & Bamberg, S. J. M. (2013). Kinetic Gait Analysis Using a Low-Cost Insole. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *60*(12), 3284–3290. <https://doi.org/10.1109/TBME.2013.2250972>
- Huang, C.-M., Cakmak, M., & Mutlu, B. (2015). Adaptive coordination strategies for Human-robot handovers. *Robotics: Science and Systems*, *11*, 1–10. <http://m.roboticsproceedings.org/rss11/p31.pdf>
- Huber, M., Rickert, M., Knoll, A., Brandt, T., & Glasauer, S. (2008). Human-robot interaction in handing-over tasks. *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 107–112. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2008.4600651>
- Hudson, C., Bethel, C. L., Carruth, D. W., Pleva, M., Juhar, J., & Ondas, S. (2017). A training tool for speech driven human-robot interaction applications. *2017 15th International Conference on Emerging ELearning Technologies and Applications (ICETA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICETA.2017.8102488>

- Humphrey, S. E., Nahrgang, J. D., & Morgeson, F. P. (2007). Integrating motivational, social, and contextual work design features: A meta-analytic summary and theoretical extension of the work design literature. *Journal of Applied Psychology*, 92(5), 1332–1356. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.92.5.1332>
- Hüttermann, S., Noël, B., & Memmert, D. (2018). Eye tracking in high-performance sports: Evaluation of its application in expert athletes. *International Journal of Computer Science in Sport*, 17(2), 182–203. <https://doi.org/10.2478/ijcss-2018-0011>
- INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). (1998). *Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la Manipulación manual de cargas* (Guías Técnicas).
- International Federation of Robotics. (2021). *World robotics 2021 industrial robots* (IFR Statistical Department). <https://www.vdmashop.de/World-Robotics-228/World-Robotics-2020-Industrial-Robots---PDF-Edition-1724.html>
- Iqbal, T., & Riek, L. D. (2014). Role Distribution in Synchronous Human-Robot Joint Action. *RO-MAN 2014 - The 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 423–428.
- ISO/TC 184 Systèmes d'automatisation et intégration. (2012). *ISO 8373:2012 Robots et composants robotiques—Vocabulaire*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:fr>
- ISO/TC 199 Sécurité des machines. (2015). *ISO 13849-1:2015 Sécurité des machines—Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité—Partie 1: Principes généraux de conception*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13849:-1:ed-3:v1:fr>
- ISO/TC 299 Robotique. (2011a). *ISO 10218-1:2011 Robots et dispositifs robotiques—Exigences de sécurité pour les robots industriels—Partie 1: Robots*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10218:-1:ed-2:v1:fr>
- ISO/TC 299 Robotique. (2011b). *ISO 10218-2:2011 Robots et dispositifs robotiques—Exigences de sécurité pour les robots industriels—Partie 2: Systèmes robots et intégration*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10218:-2:ed-1:v1:fr>
- ISO/TC 299 Robotique. (2014). *ISO 13482:2014 Robots et composants robotiques—Exigences de sécurité pour les robots de soins personnels*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13482:ed-1:v1:fr>
- ISO/TC 299 Robotique. (2021). *ISO 8373:2021 Robotique—Vocabulaire*. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:fr>

- Isreal, J. B., Chesney, G. L., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1980). P300 and tracking difficulty: Evidence for multiple resources in dual-task performance. *Psychophysiology*, *17*(3), 259–273.
- Itti, L., & Koch, C. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(3), 194–203. <https://doi.org/10.1038/35058500>
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *20*(11), 1254–1259. <https://doi.org/10.1109/34.730558>
- Jacob, R., & Karn, K. (2003). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. In J. Hyönä, R. Radach, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research* (pp. 573–605). North-Holland.
- Jain, R., Meena, M. L., Sain, M. K., & Dangayach, G. S. (2019). Impact of posture and upper-limb muscle activity on grip strength. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, *25*(4), 614–620. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1501972>
- James, W. (1890). *The Principles of Psychology* (Vol. 1). Dover.
- Josephson, M., Lagerstrom, M., Hagberg, M., & Wigaeus Hjelm, E. (1997). Musculoskeletal symptoms and job strain among nursing personnel: A study over a three year period. *Occupational and Environmental Medicine*, *54*(9), 681–685. <https://doi.org/10.1136/oem.54.9.681>
- Jovancevic-Misic, J., & Hayhoe, M. (2009). Adaptive Gaze Control in Natural Environments. *Journal of Neuroscience*, *29*(19), 6234–6238. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5570-08.2009>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.
- Kapitaniak, B. (2021). Capacités physiques, sensorielles, perceptives, cognitives. In E. Brangier & G. Vallery, *Ergonomie: 150 notions clés* (Dunod, pp. 140–145).
- Karhu, O., Härkönen, R., Sorvali, P., & Vepsäläinen, P. (1981). Observing working postures in industry: Examples of OWAS application. *Applied Ergonomics*, *12*(1), 13–17. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(81\)90088-0](https://doi.org/10.1016/0003-6870(81)90088-0)
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, *70*(6, Pt.1), 387–403. <https://doi.org/10.1037/h0026739>
- Kelly, V. E., Janke, A. A., & Shumway-Cook, A. (2010). Effects of instructed focus and task difficulty on concurrent walking and cognitive task performance in healthy young

- adults. *Experimental Brain Research*, 207(1–2), 65–73. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2429-6>
- Kerlirzin, Y., Dietrich, G., & Vieilledent, S. (2009). *Le contrôle moteur: Organisation et contrôle du mouvement*. Presses universitaires de France.
- Khandan, M., Mirshekari, F., Koorsani, E., Mosaferchi, S., & Koohpaei, A. (2018). Subjective workload and musculoskeletal disorders among workers of a manufacturing company in Iran. *Biotech Health Sciences*, 5(1), 1–6.
- Kim, H.-G., Cheon, E.-J., Bai, D.-S., Lee, Y. H., & Koo, B.-H. (2018). Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry Investigation*, 15(3), 235–245. <https://doi.org/10.30773/pi.2017.08.17>
- Kim, W., Lorenzini, M., Kapicioglu, K., & Ajoudani, A. (2018). ErgoTac: A Tactile Feedback Interface for Improving Human Ergonomics in Workplaces. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4), 4179–4186. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2864356>
- Klitou, D., Conrads, J., Rasmussen, M., Probst, L., & Pedersen, B. (2017a). *France: Industrie du Futur* (Digital Transformation Monitor). European Commission, Directorate-General Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. <https://ati.ec.europa.eu/reports/policy-briefs/france-industrie-du-futur>
- Klitou, D., Conrads, J., Rasmussen, M., Probst, L., & Pedersen, B. (2017b). *Germany: Industrie 4.0* (Digital Transformation Monitor). European Commission, Directorate-General Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2020-06/DTM_Industrie%204.0_DE.pdf
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental Components of Attention. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 57–78. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.30.051606.094256>
- Koch, C., & Ullman, S. (1985). Shifts in selective visual attention: Towards the underlying neural circuitry. *Human Neurobiology*, 4(4), 219–227.
- Komogortsev, O. V., Gobert, D. V., Jayarathna, S., Koh, D. H., & Gowda, S. M. (2010). Standardization of automated analyses of oculomotor fixation and saccadic behaviors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(11), 12.
- Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25years. *Vision Research*, 51(13), 1457–1483. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.12.014>
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision Research*, 35(13), 1897–1916. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)00279-U](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)00279-U)

- Krajenbrink, H., van Abswoude, F., Vermeulen, S., van Cappellen, S., & Steenbergen, B. (2018). Motor learning and movement automatization in typically developing children: The role of instructions with an external or internal focus of attention. *Human Movement Science*, *60*, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.06.010>
- Kramarz, F., Cahuc, P., Crépon, B., Schank, T., Skans, O. N., van Lomwel, G., & Zylberberg, A. (2008). Labour Market Effects of Work- Sharing Arrangements in Europe. In T. Boeri, M. Burda, & F. Kramarz, *Working hours and job sharing in the EU and USA: Are Europeans lazy? Or Americans crazy?* (Oxford University Press, pp. 171–196).
- Krejtz, K., Coltekin, A., Duchowski, A., & Niedzielska, A. (2017). Using coefficient K to distinguish ambient/focal visual attention during map viewing. *Journal of Eye Movement Research*, *10*(2). <https://doi.org/10.16910/jemr.10.2.3>
- Krejtz, K., Duchowski, A., Krejtz, I., Szarkowska, A., & Kopacz, A. (2016). Discerning Ambient/Focal Attention with Coefficient K. *ACM Transactions on Applied Perception*, *13*(3), 1–20. <https://doi.org/10.1145/2896452>
- Kumar, S. (2004). *Muscle strength*. CRC Press.
- Kwakkel, G., van Wegen, E. E. H., Burridge, J. H., Winstein, C. J., van Dokkum, L. E. H., Alt Murphy, M., Levin, M. F., Krakauer, J. W., Lang, C. E., Keller, T., Kitago, T., Nordin, N., Pomeroy, V., Veerbeek, J. M., & van Wijck, F. (2019). Standardized Measurement of Quality of Upper Limb Movement After Stroke: Consensus-Based Core Recommendations From the Second Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, *33*(11), 951–958. <https://doi.org/10.1177/1545968319886477>
- la Fougère, C., Zwergal, A., Rominger, A., Förster, S., Fesl, G., Dieterich, M., Brandt, T., Strupp, M., Bartenstein, P., & Jahn, K. (2010). Real versus imagined locomotion: A [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *NeuroImage*, *50*(4), 1589–1598. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.12.060>
- Lamy, X. (2011). *Conception d'une Interface de Pilotage d'un Cobot*. Pierre & Marie Curie.
- Larsman, P., & Hanse, J. J. (2009). The impact of decision latitude, psychological load and social support at work on the development of neck, shoulder and low back symptoms among female human service organization workers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *39*(2), 442–446. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2009.01.002>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, *6*(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

- Lasota, P. A., & Shah, J. A. (2015). Analyzing the Effects of Human-Aware Motion Planning on Close-Proximity Human–Robot Collaboration. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 57(1), 21–33. <https://doi.org/10.1177/0018720814565188>
- L'Assurance Maladie. (2018). *Rapport annuel 2017—L'Assurance Maladie—Risques professionnels* (pp. 1–160). L'Assurance Maladie.
- L'Assurance Maladie. (2020). *Rapport annuel 2019—L'Assurance Maladie—Risques professionnels* (pp. 1–168). L'Assurance Maladie.
- L'Assurance Maladie. (2021). *Rapport annuel 2020—L'Assurance Maladie—Risques professionnels* (pp. 1–170). L'Assurance Maladie.
- Latash, M. L., Scholz, J. P., & Schöner, G. (2007). Toward a New Theory of Motor Synergies. *Motor Control*, 11(3), 276–308. <https://doi.org/10.1123/mcj.11.3.276>
- Laurent, M. (1987). La connaissance et l'action chez l'enfant. Problèmes théoriques et applications. In M. Laurent & P. Therme, *L'enfant par son corps*. Actio Bazina.
- Laursen, B., Jensen, B. R., & Sjøgaard, G. (1998). Effect of speed and precision demands on human shoulder muscle electromyography during a repetitive task. *European Journal of Applied Physiology*, 78(6), 544–548. <https://doi.org/10.1007/s004210050458>
- Leigh, R. J., & Zee, D. S. (2015). *The neurology of eye movements* (Oxford University Press).
- Lemonnier, S., Bouillet, K., & Roland, B. (2021a). Activités de prise d'information visuelle. In E. Brangier & G. Vallery, *Ergonomie: 150 notions clés* (Dunod, pp. 35–38).
- Lemonnier, S., Bouillet, K., & Roland, B. (2021b). Oculométrie. In E. Brangier & G. Vallery, *Ergonomie: 150 notions clés* (Dunod, pp. 377–380).
- Lemonnier, S., Brémond, R., & Baccino, T. (2015). Gaze behavior when approaching an intersection: Dwell time distribution and comparison with a quantitative prediction. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 35, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.10.015>
- Lemonnier, S., Simonin, J., & Lanfranchi, J.-B. (2023). Robots collaboratifs dans l'industrie française en 2021: Acceptation des opérateurs et points de vue d'industriels. *IHM '23: Proceedings of the 34th Conference on l'Interaction Humain-Machine*, 1–8. <https://doi.org/10.1145/3583961.3583979>
- Leslie, D. (1984). The Productivity of Hours in U.S. Manufacturing Industries. *The Review of Economics and Statistics*, 66(3), 486–490. <https://doi.org/10.2307/1925007>

- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment* (Oxford University Press). Oxford University Press.
- Li, S., & Zhang, X. (2017). Implicit Intention Communication in Human–Robot Interaction Through Visual Behavior Studies. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(4), 437–448.
- Liechty, J., Pieters, R., & Wedel, M. (2003). Global and local covert visual attention: Evidence from a bayesian hidden markov model. *Psychometrika*, 68(4), 519–541. <https://doi.org/10.1007/BF02295608>
- Liker, J. K. (2004). *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill.
- Lomond, K. V., & Côté, J. N. (2010). Movement timing and reach to reach variability during a repetitive reaching task in persons with chronic neck/shoulder pain and healthy subjects. *Experimental Brain Research*, 206(3), 271–282. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2405-1>
- Lundin-Olsson, L., Nyberg, L., Gustafson, Y., Himbert, D., Seknadji, P., Karila-Cohen, D., Juliard, J.-M., & Steg, P. G. (1997). “Stops walking when talking” as a predictor of falls in elderly people. *The Lancet*, 349, 3.
- Luro, F. L., & Sundstedt, V. (2019). A comparative study of eye tracking and hand controller for aiming tasks in virtual reality. *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, 1–9. <https://doi.org/10.1145/3317956.3318153>
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163–203.
- Madeleine, P. (2010). On functional motor adaptations: From the quantification of motor strategies to the prevention of musculoskeletal disorders in the neck-shoulder region: Motor adaptations in the neck and shoulder. *Acta Physiologica*, 199, 1–46. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.2010.02145.x>
- Madeleine, P., & Farina, D. (2008). Time to task failure in shoulder elevation is associated to increase in amplitude and to spatial heterogeneity of upper trapezius mechanomyographic signals. *European Journal of Applied Physiology*, 102(3), 325–333. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0589-2>
- Madeleine, P., Voigt, M., & Mathiassen, S. E. (2008). The size of cycle-to-cycle variability in biomechanical exposure among butchers performing a standardised cutting task. *Ergonomics*, 51(7), 1078–1095. <https://doi.org/10.1080/00140130801958659>

- Malchaire, J., Gauthy, R., Piette, A., & Strambi, F. (2011). *Classification de méthodes d'évaluation et/ou de prévention des risques de troubles musculosquelettiques: Guide*. ETUI.
- Mariscal, M. A., Gonzalez-Pérez, J., Azimian, A., Lopez-Perea, E., & Garcia-Herrero, S. (2020). Comparison of workers performance in Human-Human and Human-Cobot Interactions. *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, 2693–2700. https://doi.org/10.3850/978-981-14-8593-0_4110-cd
- Marks, M. A., Mathieu, J. E., & Zaccaro, S. J. (2001). A temporally based framework and taxonomy of team processes. *Academy of Management Review*, 26(3), 356–376.
- Marlow, S. L., Lacerenza, C. N., Paoletti, J., Burke, C. S., & Salas, E. (2018). Does team communication represent a one-size-fits-all approach?: A meta-analysis of team communication and performance. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 144, 145–170.
- Marois, R., Larson, J. M., Chun, M. M., & Shima, D. (2006). Response-specific sources of dual-task interference in human pre-motor cortex. *Psychological Research*, 70(6), 436–447. <https://doi.org/10.1007/s00426-005-0022-6>
- Marques, R., Martins, F., Mendes, R., Coelho, M., & Gonçalo Dias, S. (2018). The use of eye tracking glasses in basketball shooting: A systematic review. *Journal of Physical Education and Sport*, 18(1), 175–183.
- Materna, Z., Kapinus, M., Beran, V., Smrz, P., & Zemcik, P. (2018). Interactive Spatial Augmented Reality in Collaborative Robot Programming: User Experience Evaluation. *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 80–87. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525662>
- Mathiassen, S. E., & Winkel, J. (1996). Physiological comparison of three interventions in light assembly work: Reduced work pace, increased break allowance and shortened working days. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 68(2), 94–108. <https://doi.org/10.1007/BF00381241>
- Mathur, A., Gehrman, J., & Atchison, D. A. (2013). Pupil shape as viewed along the horizontal visual field. *Journal of Vision*, 13(6), 3–3. <https://doi.org/10.1167/13.6.3>
- Maurice, P., Allienne, L., Malaise, A., & Ivaldi, S. (2018). Ethical and Social Considerations for the Introduction of Human-Centered Technologies at Work. *2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO)*, 131–138. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2018.8625830>

- Maurice, P., Padois, V., Measson, Y., & Bidaud, P. (2017). Human-oriented design of collaborative robots. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *57*, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.011>
- McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, *24*(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- McLeod, P. (1977). Parallel processing and the psychological refractory period. *Acta Psychologica*, *41*(5), 381–396. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(77\)90016-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(77)90016-6)
- McLoughlin, J. V., Barr, C. J., Patrilli, B., Crotty, M., Lord, S. R., & Sturnieks, D. L. (2016). Fatigue induced changes to kinematic and kinetic gait parameters following six minutes of walking in people with multiple sclerosis. *Disability and Rehabilitation*, *38*(6), 535–543. <https://doi.org/10.3109/09638288.2015.1047969>
- Meissner, A., Trübswetter, A., Conti-Kufner, A. S., & Schmidtler, J. (2020). Friend or Foe? Understanding Assembly Workers' Acceptance of Human-robot Collaboration. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, *10*(1), 1–30. <https://doi.org/10.1145/3399433>
- Michalos, G., Spiliotopoulos, J., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2018). A method for planning human robot shared tasks. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *22*, 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.05.003>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, *24*(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Miller, N., Jenkins, O. C., Kallmann, M., & Mataric, M. J. (2004). Motion capture from inertial sensing for untethered humanoid teleoperation. *4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots, 2004.*, *2*, 547–565. <https://doi.org/10.1109/ICHR.2004.1442670>
- Milton, J. G., Small, S. S., & Solodkin, A. (2004). On the road to automatic: Dynamic aspects in the development of expertise. *Journal of Clinical Neurophysiology*, *21*(3), 134–143.
- Misslin, Q., Grosjean, J., Blandet, T., & Rose, B. (2021). *Ergonom.io ou l'ergonomie pour l'usine du futur*. 22.
- Moore, S. M., Torma-Krajewski, J., & Steiner, L. J. (2011). *Practical demonstrations of ergonomic principles* (Report of Investigations 9684; p. 66). NIOSH, Department of health and human services.
- Mor, R. S., Bhardwaj, A., Singh, S., & Sachdeva, A. (2019). Productivity gains through standardization-of-work in a manufacturing company. *Journal of Manufacturing*

- Technology Management*, 30(6), 899–919. <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0151>
- Mori, T., Takeuchi, N., & Izumi, S.-I. (2018). Prefrontal cortex activation during a dual task in patients with stroke. *Gait & Posture*, 59, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.09.032>
- Morouço, P. G., Marinho, D. A., Fernandes, R. J., & Marques, M. C. (2015). Quantification of upper limb kinetic asymmetries in front crawl swimming. *Human Movement Science*, 40, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.12.012>
- Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels. Approche cognitive. Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group*. Université de Bordeaux.
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., & Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78, 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>
- Mulder, G. (1979). Sinusarrhythmia and mental workload. In *Mental Workload* (pp. 327–343). Springer.
- Muller, H., & Loosch, H. M. E. (1999). Functionnal variability and an equifinal path of movement during targeted throwing. *Journal of Human Movement Studies*, 36, 103–126. <https://doi.org/10.1.1.453.844>
- Müller, S. L., Stiehm, S., Jeschke, S., & Richert, A. (2017). Subjective stress in hybrid collaboration. In A. Kheddar, E. Yoshida, S. S. Ge, K. Suzuki, J.-J. Cabibihan, F. Eyssele, & H. He (Eds.), *Social Robotics* (Vol. 10652, pp. 597–606). Springer International Publishing.
- Murashov, V., Hearl, F., & Howard, J. (2016). Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(3), 61–71.
- Murray, S. L., & Thimgan, M. S. (2016). Fatigue and human performance. In *Human fatigue risk management: Improving safety in the chemical processing industry* (pp. 115–128). Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Nallusamy, S. (2016). Enhancement of Productivity and Efficiency of CNC Machines in a Small Scale Industry Using Total Productive Maintenance. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 25, 119–126. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.119>
- Navon, D., & Miller, J. (1987). Role of outcome conflict in dual-task interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 435–448.

- Neto, P., Pereira, D., Pires, J. N., & Moreira, A. P. (2013). Real-time and continuous hand gesture spotting: An approach based on artificial neural networks. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 178–183. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630573>
- Neumann, W. P., Winkel, J., Medbo, L., Magneberg, R., & Mathiassen, S. E. (2006). Production system design elements influencing productivity and ergonomics: A case study of parallel and serial flow strategies. *International Journal of Operations & Production Management*, 26(8), 904–923. <https://doi.org/10.1108/01443570610678666>
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting, *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (Springer Netherlands, Vol. 1, pp. 341–360).
- Nikolaidis, S., Kwon, M., Forlizzi, J., & Srinivasa, S. (2018). Planning with Verbal Communication for Human-Robot Collaboration. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, 7(3), 1–21. <https://doi.org/10.1145/3203305>
- Nikolaidis, S., & Shah, J. (2013). Human-robot cross-training: Computational formulation, modeling and evaluation of a human team training strategy. *2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 33–40.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). (1981). *Work practices guide for manual lifting*. (81–122; NIOSH Technical Report).
- Nonaka, S., Inoue, K., Arai, T., & Mae, Y. (2004). Evaluation of human sense of security for coexisting robots using virtual reality. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 2770–2775.
- Norman, D. A. (1968). Toward a theory of memory and attention. *Psychological Review*, 75(6), 522–536.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. G. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7(1), 44–64.
- Noy, L., Rumiati, R. I., & Flash, T. (2009). Simple movement imitation: Are kinematic features sufficient to map perceptions into actions? *Brain and Cognition*, 69(2), 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.08.030>
- Olivers, C. N. L., & Hickey, C. (2010). Priming resolves perceptual ambiguity in visual search: Evidence from behaviour and electrophysiology. *Vision Research*, 50(14), 1362–1371. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.11.022>

- Onnasch, L., Maier, X., & Jürgensohn, T. (2016). *Mensch-Roboter-Interaktion—Eine taxonomie für alle anwendungsfälle*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. <http://www.baua.de/dok/8026758>
- Palinko, O., Rea, F., Sandini, G., & Sciutti, A. (2016). *A Robot Reading Human Gaze: Why Eye Tracking Is Better Than Head Tracking for Human-Robot Collaboration*. 5048–5054.
- Pang, M. Y. C., Yang, L., Ouyang, H., Lam, F. M. H., Huang, M., & Jehu, D. A. (2018). Dual-Task Exercise Reduces Cognitive-Motor Interference in Walking and Falls After Stroke: A Randomized Controlled Study. *Stroke*, *49*(12), 2990–2998. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.118.022157>
- Pashler, H. (1994). Dual-Task Interference in Simple Tasks: Data and Theory. *Psychological Bulletin*, *116*(2), 220–244.
- Patel, P., & Bhatt, T. (2014). Task Matters: Influence of Different Cognitive Tasks on Cognitive-Motor Interference During Dual-Task Walking in Chronic Stroke Survivors. *Topics in Stroke Rehabilitation*, *21*(4), 347–357. <https://doi.org/10.1310/tsr2104-347>
- Patel, P., Lamar, M., & Bhatt, T. (2014). Effect of type of cognitive task and walking speed on cognitive-motor interference during dual-task walking. *Neuroscience*, *260*, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.016>
- Pearce, M., Mutlu, B., Shah, J., & Radwin, R. (2018). Optimizing Makespan and Ergonomics in Integrating Collaborative Robots Into Manufacturing Processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *15*(4), 1772–1784. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2789820>
- Peelen, M. V., Heslenfeld, D. J., & Theeuwes, J. (2004). Endogenous and exogenous attention shifts are mediated by the same large-scale neural network. *NeuroImage*, *22*(2), 822–830. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.01.044>
- Pencavel, J. H. (2015). The Productivity of Working Hours. *The Economic Journal*, *125*(589), 2052–2076.
- Perez-D'Arpino, C., & Shah, J. A. (2015). Fast target prediction of human reaching motion for cooperative human-robot manipulation tasks using time series classification. *2015 IEEE Int Conf Robot Autom*, 6175–6182. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140066>
- Peruzzini, M., Grandi, F., & Pellicciari, M. (2017). Benchmarking of Tools for User Experience Analysis in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, *11*, 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.182>
- Peternel, L., Tsagarakis, N., Caldwell, D., & Ajoudani, A. (2018). Robot adaptation to human physical fatigue in human–robot co-manipulation. *Autonomous Robots*, *42*(5), 1011–1021. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9678-1>

- Petit, A., Ha, C., Bodin, J., Parot-Schinkel, E., Ramond, A., Leclerc, A., Imbernon, E., & Roquelaure, Y. (2014). Personal, Biomechanical, Organizational and Psychosocial Risk Factors for Neck Disorders in a Working Population. *Journal of Occupational Health*, *56*(2), 134–140. <https://doi.org/10.1539/joh.13-0186-OA>
- Petruck, H., Faber, M., Giese, H., Geibel, M., Mostert, S., Usai, M., Mertens, A., & Brandl, C. (2019). Human-Robot Collaboration in manual assembly – A collaborative workplace. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Eds.), *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)* (Vol. 825, pp. 21–28). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5_3
- Pezzulo, G., Donnarumma, F., Dindo, H., D’Ausilio, A., Konvalinka, I., & Castelfranchi, C. (2019). The body talks: Sensorimotor communication and its brain and kinematic signatures. *Physics of Life Reviews*, *28*, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2018.06.014>
- Pfeiffer, J., Pfeiffer, T., Meißner, M., & Weiß, E. (2020). Eye-Tracking-Based Classification of Information Search Behavior Using Machine Learning: Evidence from Experiments in Physical Shops and Virtual Reality Shopping Environments. *Information Systems Research*, *31*(3), 675–691. <https://doi.org/10.1287/isre.2019.0907>
- Pires, J. (2005). Robot-by-voice: Experiments on commanding an industrial robot using the human voice. *Industrial Robot: An International Journal*, *32*(6), 505–511. <https://doi.org/10.1108/01439910510629244>
- Pollak, A., Paliga, M., Pulopulos, M. M., Kozusznik, B., & Kozusznik, M. W. (2020). Stress in manual and autonomous modes of collaboration with a cobot. *Computers in Human Behavior*, *112*, 106469. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106469>
- Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2016). Interstimulus intervals and sensory modality modulate the impact of a cognitive task on postural control. *Journal of Motor Behavior*, *48*(6), 482–488. <https://doi.org/10.1080/00222895.2015.1134435>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *32*(1), 3–25.
- Posner, M. I., & Cohen, Y. (1984). Components of visual orienting. In H. Bouma & D. Bouwhuis, *Attention and performance X: control of language processes*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Potvin, J. R. (2014). Comparing the revised NIOSH lifting equation to the psychophysical, biomechanical and physiological criteria used in its development. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *44*(2), 246–252. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.07.003>

- Prinz, W. (1997). Perception and Action Planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129–154. <https://doi.org/10.1080/713752551>
- Ranganathan, R., & Newell, K. M. (2010). Influence of motor learning on utilizing path redundancy. *Neuroscience Letters*, 469(3), 416–420. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.12.041>
- Rau, G., Disselhorst-Klug, C., & Schmidt, R. (2000). Movement biomechanics goes upwards: From the leg to the arm. *Journal of Biomechanics*, 33, 1207–1216.
- Rayner, K. (1998). Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.
- Realyvásquez-Vargas, A., Flor-Moltalvo, F. J., Blanco-Fernández, J., Sandoval-Quintanilla, J. D., Jiménez-Macías, E., & García-Alcaraz, J. L. (2019). Implementation of Production Process Standardization—A Case Study of a Publishing Company from the SMEs Sector. *Processes*, 7(10), 646. <https://doi.org/10.3390/pr7100646>
- Rhodes, S., Jaroslawska, A. J., Doherty, J. M., Belletier, C., Naveh-Benjamin, M., Cowan, N., Camos, V., Barrouillet, P., & Logie, R. H. (2019). Storage and processing in working memory: Assessing dual-task performance and task prioritization across the adult lifespan. *Journal of Experimental Psychology: General*, 148(7), 1204–1227. <https://doi.org/10.1037/xge0000539>
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26(6), 867–891. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.002>
- Richer, N., & Lajoie, Y. (2019). Cognitive task modality influences postural control during quiet standing in healthy older adults. *Aging Clinical and Experimental Research*, 31(9), 1265–1270. <https://doi.org/10.1007/s40520-018-1068-9>
- Richer, N., Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). Continuous cognitive task promotes greater postural stability than an internal or external focus of attention in older adults. *Experimental Aging Research*, 43(1), 21–33. <https://doi.org/10.1080/0361073X.2017.1258214>
- Roby-Brami, A., Hoffmann, G., Laffont, I., Combeaud, M., & Hannequin, S. (2005). Redondance du membre supérieur et compensation des déficiences motrices. In Y. Coello, S. Casalis, & C. Moroni, *Vision, espace et cognition: Fonctionnement normal et pathologique* (pp. 143–160). Presses Universitaires Septentrion.
- Rojas, R. A., Ruiz Garcia, M. A., Gualtieri, L., Wehrle, E., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Automatic planning of psychologically less-stressful trajectories in collaborative

- workstations: An integrated toolbox for unskilled users. *ROMANSY 23 -Robot Design, Dynamics and Control: Proceedings of the 23rd CISM IFToMM Symposium*, 118–126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58380-4_15
- Roman-Liu, D., & Tokarski, T. (2005). Upper limb strength in relation to upper limb posture. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(1), 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.07.002>
- Rosenbaum, D. A. (2009). *Human motor control* (Academic press).
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., & Harnisch, M. (2015). *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*. 14.
- Rustum, R., & Adeloye, A. J. (2007). Replacing Outliers and Missing Values from Activated Sludge Data Using Kohonen Self-Organizing Map. *Journal of Environmental Engineering*, 133(9), 909–916. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2007\)133:9\(909\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:9(909))
- Ryu, K., & Myung, R. (2005). Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(11), 991–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.04.005>
- Sadrifaridpour, B., Saeidi, H., & Wang, Y. (2016). An integrated framework for human-robot collaborative assembly in hybrid manufacturing cells. *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 462–467. <https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743441>
- Salotti, J.-M., Ferreri, E., Ly, O., & Daney, D. (2017). Classification des systèmes cobotiques. *Ingénierie cognitive*, 1(1). <https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2018.0268>
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications - ETRA '00*, 71–78. <https://doi.org/10.1145/355017.355028>
- Santis, A. D., & Siciliano, B. (2008). Safety issues for human-robot cooperation in manufacturing systems. *Tools and Perspectives in Virtual Manufacturing*, 12.
- Schepers, M., Giuberti, M., & Bellusci, G. (2018). *Xsens MVN: Consistent tracking of human motion using inertial sensing* (pp. 1–8) [Xsens Technologies]. https://www.researchgate.net/profile/Martin-Schepers/publication/324007368_Xsens_MVN_Consistent_Tracking_of_Human_Motion_Using_Inertial_Sensing/links/5ab8be2f0f7e9b68ef51f7ba/Xsens-MVN-Consistent-Tracking-of-Human-Motion-Using-Inertial-Sensing.pdf

- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), Article 4.
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2008). *Motor learning and performance: A situation-based learning approach*. Human kinetics.
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: Coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 884–900. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.3.884>
- Schmidler, J., & Bengler, K. (2015). Fast or accurate? – Performance measurements for physical human-robot collaborations. *Procedia Manufacturing*, 3, 1387–1394. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.298>
- Schmidler, J., Harbauer, C., & Bengler, K. (2014). *Investigation of human behaviour in pushing and pulling tasks for direct manipulation of a collaborative robot*. Proceedings of the human factors and ergonomics society europe chapter Europe Chapter 2014 Annual Conference. ISSN 2333-4959. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4230.1601>
- Scholtz, J. (2003). Theory and evaluation of human robot interactions. *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of The*, 10 pp. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2003.1174284>
- Schüldt, K., Ekholm, J., Harms-Ringdahl, K., Arborelius, U. P., & Németh, G. (1987). Influence of sitting postures on neck and shoulder emg during arm-hand work movements. *Clinical Biomechanics*, 2(3), 126–139.
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in Joint Action: What, When, and Where. *Topics in Cognitive Science*, 1(2), 353–367. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2009.01024.x>
- Segura Parra, P., Lobato Calleros, O., & Ramirez-Serrano, A. (2020, November). *Human-Robot Collaboration Systems: Components and Applications*. The 7th International Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics. <https://doi.org/10.11159/cdsr20.150>
- Serrien, D. J. (2009). Verbal–manual interactions during dual task performance: An EEG study. *Neuropsychologia*, 47(1), 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.08.004>
- Shah, J., Wiken, J., Williams, B., & Breazeal, C. (2011). Improved human-robot team performance using chaski, a human-inspired plan execution system. *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Robot Interaction - HRI '11*, 29–36. <https://doi.org/10.1145/1957656.1957668>

- Shi, L., Copot, C., & Vanlanduit, S. (2021). GazeEMD: Detecting Visual Intention in Gaze-Based Human-Robot Interaction. *Robotics*, *10*(2), 68. <https://doi.org/10.3390/robotics10020068>
- Shibasaki, H. (2012). Cortical activities associated with voluntary movements and involuntary movements. *Clinical Neurophysiology*, *123*(2), 229–243. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2011.07.042>
- Shravani, N. K., & Rao, S. (2018a). Introducing robots without creating fear of unemployment and high cost in industries. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, *5*(1), 11.
- Shravani, N. K., & Rao, S. (2018b). Introducing robots without creating fear of unemployment and high cost in industries. *International Journal of Engineering Technology Science and Research*, *5*(1), Article 1.
- Simonet, P. (1986). *Apprentissages moteurs: Processus et procédés d'acquisition*. Vigot.
- Singh, H., Motwani, J., & Kumar, A. (2000). A review and analysis of the state-of-the-art research on productivity measurement. *Industrial Management & Data Systems*, *100*(5), 234–241. <https://doi.org/10.1108/02635570010335271>
- Sink, S. D., Tuttle, T. C., & Shin, S. I. (1989). *Planning and measurement in your organization of the future*. Industrial Engineering and Management Press.
- Sloan, R. P., Shapiro, P. A., Bagiella, E., Boni, S. M., Paik, M., Bigger, J. T., Steinman, R. C., & Gorman, J. M. (1994). Effect of mental stress throughout the day on cardiac autonomic control. *Biological Psychology*, *37*(2), 89–99. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(94\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0301-0511(94)90024-8)
- Sloot, L. H., & van der Krogt, M. M. (2018). Interpreting Joint Moments and Powers in Gait. In *Handbook of Human Motion* (Vol. 1, pp. 625–643). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14418-4_32
- Sodhi, M., Reimer, B., Cohen, J. L., Vastenburg, E., & Kaars, I. (2002). On-road driver eye movement tracking using head-mounted devices. In *Proceeding of the 2002 systems synopsis on eye-tracking research & applications* (pp. 61–68).
- Solomonow, M., Baratta, R., Bernardi, M., Zhou, B., Lu, Y., Zhu, M., & Acierno, S. (1994). Surface and wire EMG crosstalk in neighbouring muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *4*(3), 131–142. [https://doi.org/10.1016/1050-6411\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/1050-6411(94)90014-0)
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, *74*(11), 1–29.

- Sprague, N., & Ballard, D. (2003). *Eye Movements for Reward Maximization*. 16, 1–8.
- Sprague, N., Ballard, D., & Robinson, A. (2007). Modeling embodied visual behaviors. *ACM Transactions on Applied Perception*, 4(2), 11. <https://doi.org/10.1145/1265957.1265960>
- Srinivasan, D., & Mathiassen, S. E. (2012). Motor variability in occupational health and performance. *Clinical Biomechanics*, 27(10), 979–993. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2012.08.007>
- Srinivasan, D., Samani, A., Mathiassen, S. E., & Madeleine, P. (2015). The size and structure of arm movement variability decreased with work pace in a standardised repetitive precision task. *Ergonomics*, 58(1), 128–139. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.957736>
- Stein, J.-P., Liebold, B., & Ohler, P. (2019). Stay back, clever thing! Linking situational control and human uniqueness concerns to the aversion against autonomous technology. *Computers in Human Behavior*, 95, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.01.021>
- Stolt, A., Linderöth, M., Robertsson, A., & Johansson, R. (2011). Force controlled assembly of emergency stop button. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3751–3756. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979745>
- Storm, F. A., Chiappini, M., Dei, C., Piazza, C., André, E., Reißner, N., Brdar, I., Delle Fave, A., Gebhard, P., Malosio, M., Peña Fernández, A., Štefok, S., & Reni, G. (2022). Physical and mental well-being of cobot workers: A scoping review using the Software-Hardware-Environment-Liveware-Liveware-Organization model. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 32(5), 419–435. <https://doi.org/10.1002/hfm.20952>
- Summerfield, C., & Egner, T. (2009). Expectation (and attention) in visual cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(9), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.06.003>
- Sundelin, G. (1993). Patterns of electromyographic shoulder muscle fatigue during MTM-paced repetitive arm work with and without pauses. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64(7), 485–493. <https://doi.org/10.1007/BF00381096>
- Swinnen, S. P. (2002). Intermanual coordination: From behavioural principles to neural-network interactions. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(5), 348–359. <https://doi.org/10.1038/nrn807>
- Szalma, J. L. (2008). Individual differences in stress reaction. In J. L. Szalma & P. A. Hancock, *Performance under stress* (pp. 339–374). Ashgate Pub.

- Tadano, K., & Kawashima, K. (2007). Development of a Master Slave System with Force Sensing Using Pneumatic Servo System for Laparoscopic Surgery. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 947–952. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363107>
- Takala, E.-P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.-Å., Mathiassen, S. E., Neumann, W. P., Sjøgaard, G., Veiersted, K. B., Westgaard, R. H., & Winkel, J. (2010). Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 36(1), 3–24.
- Taleb, I. (2022). *Identification et évaluation des temps non productifs par la simulation de systèmes de production pour améliorer la productivité et les conditions de travail*. HESAM Université.
- Tangen, S. (2005). Demystifying productivity and performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 54(1), 34–46. <https://doi.org/10.1108/17410400510571437>
- Tantawi, K. H., Sokolov, A., & Tantawi, O. (2019). Advances in Industrial Robotics: From Industry 3.0 Automation to Industry 4.0 Collaboration. *2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-ICON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIMES-iCON47539.2019.9024658>
- Tapus, A., & Mataric, M. J. (2008). Socially assistive robots: The link between personality, empathy, physiological signals, and task performance. *AAAI Spring Synopsium: Emotion, Personality, and Social Behavior*, 133–140.
- Tatarian, K., Chamoux, M., Pandey, A. K., & Chetouani, M. (2021). Robot Gaze Behavior and Proxemics to Coordinate Conversational Roles in Group Interactions. *2021 30th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 1297–1304. <https://doi.org/10.1109/RO-MAN50785.2021.9515550>
- Tausch, A., & Kluge, A. (2020). The best task allocation process is to decide on one's own: Effects of the allocation agent in human–robot interaction on perceived work characteristics and satisfaction. *Cognition, Technology & Work*, 24(1), 39–55. <https://doi.org/10.1007/s10111-020-00656-7>
- Taylor, R. (1990). Interpretation of the correlation coefficient: A basic review. *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, 6(1), 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
- Theeuwes, J. (2010). Top-down and bottom-up control of visual selection: Reply to commentaries. *Acta Psychologica*, 135(2), 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.07.006>

- Tichauer, E. R. (1966). Some aspects of stress on forearm and hand in industry. *Journal of Occupational Medicine*, 8(2), 63–71.
- Tisserand, R., Armand, S., Allali, G., Schnider, A., & Baillieux, S. (2018). Cognitive-motor dual-task interference modulates mediolateral dynamic stability during gait in post-stroke individuals. *Human Movement Science*, 58, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.01.012>
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12, 242–248.
- Treisman, A. M. (1964). Verbal cues, language and meaning in selective attention. *American Journal of Psychology*, 77, 206–219.
- Treisman, A. M. (1969). Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, 76, 282–299.
- Tsarouchi, P., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2016). Human-robot interaction review and challenges on task planning and programming. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(8), 916–931. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130251>
- Uguen, C., Sablon, S., & Carballeda, G. (2018). Intégration de la préparation physique dans l'approche ergonomique: Quel dispositif pour quel(s) objectif(s) ? *Activites*, 15(2), 1–34. <https://doi.org/10.4000/activites.3537>
- Unema, P. J. A., Pannasch, S., Joos, M., & Velichkovsky, B. M. (2005). Time course of information processing during scene perception: The relationship between saccade amplitude and fixation duration. *Visual Cognition*, 12(3), 473–494. <https://doi.org/10.1080/13506280444000409>
- Valevicius, A. M., Jun, P. Y., Hebert, J. S., & Vette, A. H. (2018). Use of optical motion capture for the analysis of normative upper body kinematics during functional upper limb tasks: A systematic review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 40, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2018.02.011>
- van der Kruk, E., & Reijne, M. M. (2018). Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 806–819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>
- van der Wel, P., & van Steenbergen, H. (2018). Pupil dilation as an index of effort in cognitive control tasks: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(6), 2005–2015. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1432-y>
- van Geffen, S. (2021). *Perceived autonomy in assembly: What is the effect of collaboration between operator and cobot?* [Master thesis].

- VanSwearingen, J. M., & Studenski, S. A. (2014). Aging, Motor Skill, and the Energy Cost of Walking: Implications for the Prevention and Treatment of Mobility Decline in Older Persons. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 69(11), 1429–1436. <https://doi.org/10.1093/gerona/glu153>
- Vasalya, A., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2018). Distinct motor contagions during and after observation of actions by a humanoid co-worker. *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 51–57. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525641>
- Vaufreydaz, D., Johal, W., & Combe, C. (2016). Starting engagement detection towards a companion robot using multimodal features. *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 4–16. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.01.004>
- Vercher, J. L., Gauthier, G. M., Guedon, O., Blouin, J., Cole, J., & Lamarre, Y. (1996). Self-moved target eye tracking in control and deafferented subjects: Roles of arm motor command and proprioception in arm-eye coordination. *Journal of Neurophysiology*, 76(2), 1133–1144. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.76.2.1133>
- Vianello, L., Ivaldi, S., Aubry, A., & Peternel, L. (2023). The effects of role transitions and adaptation in human–cobot collaboration. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02104-5>
- Vignais, N., Miezal, M., Bleser, G., Mura, K., Gorecky, D., & Marin, F. (2012). Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. *Applied Ergonomics*, 44(4), 566–574.
- Wang, S., & Gathercole, S. E. (2013). Working memory deficits in children with reading difficulties: Memory span and dual task coordination. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(1), 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.11.015>
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749–776. <https://doi.org/10.1080/00140139308967940>
- Williams, S., Schmidt, R., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2006). An upper body model for the kinematical analysis of the joint chain of the human arm. *Journal of Biomechanics*, 39(13), 2419–2429. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.07.023>
- Winkel, J., & Westgaard, R. H. (2008). Risk factors of occupational MSDs and potential solutions: Past, present and future. *Risk*, 34, 3–7.
- Wioland, L., Debay, L., & Atain-Kouadio, J.-J. (2019). Acceptation des exosquelettes par les opérateurs: Étude exploratoire. *Références en santé au travail*, 157, 45–61.

- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, *5*(6), 495–501. <https://doi.org/10.1038/nrn1411>
- Wu, T., Liu, J., Hallett, M., Zheng, Z., & Chan, P. (2013). Cerebellum and integration of neural networks in dual-task processing. *NeuroImage*, *65*, 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.10.004>
- Yanco, H. A., & Drury, J. (2004). Classifying human-robot interaction: An updated taxonomy. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, *3*, 2841–2846. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1400763>
- Yang, L., He, C., & Pang, M. Y. C. (2016). Reliability and Validity of Dual-Task Mobility Assessments in People with Chronic Stroke. *PLOS ONE*, *11*(1), e0147833. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147833>
- Yang, Q., Tian, C., Tseng, B., Zhang, B., Huang, S., Jin, S., & Mao, J. (2020). Gait Change in Dual Task as a Behavioral Marker to Detect Mild Cognitive Impairment in Elderly Persons: A Systematic Review and Meta-analysis. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, *101*(10), 1813–1821. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.05.020>
- Yantis, S. (2000). Goal-directed and stimulus-driven determinants of attentional control. In S. Monsell & J. Driver (Eds.), *Control of Cognitive Processes: Attention and performance* (Vol. 18, pp. 73–103). MIT Press.
- Yarbus, A. L. (1967). *Eye movements and vision*. Plenum.
- Yogev-Seligmann, G., Hausdorff, J. M., & Giladi, N. (2012). Do we always prioritize balance when walking? Towards an integrated model of task prioritization: Integrated Model of Task Prioritization. *Movement Disorders*, *27*(6), 765–770. <https://doi.org/10.1002/mds.24963>
- Yogev-Seligmann, G., Rotem-Galili, Y., Mirelman, A., Dickstein, R., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2010). How Does Explicit Prioritization Alter Walking During Dual-Task Performance? Effects of Age and Sex on Gait Speed and Variability. *Physical Therapy*, *90*(2), 177–186. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090043>
- Yung, M. (2016). *Fatigue at the Workplace: Measurement and Temporal Development*. University of Waterloo.
- Zäh, M. F., Beetz, M., Shea, K., Reinhart, G., Bender, K., Lau, C., & Ertelt, C. (2009). The cognitive factory. In *Changeable and reconfigurable manufacturing systems* (pp. 355–371). Springer.

Złotowski, J., Yogeeswaran, K., & Bartneck, C. (2017). Can we control it? Autonomous robots threaten human identity, uniqueness, safety, and resources. *International Journal of Human-Computer Studies*, *100*, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2016.12.008>

Valorisations pendant la thèse

Articles de revues internationales :

- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanche, F., & Gauchard, G. Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task?. *PLoS ONE*, 18(8), e0289787. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787>

Chapitres d'ouvrage :

- Lemonnier, S., Bouillet K. & Brémond R. (2021). Activités de prise d'information visuelle. In E. Brangier & G. Valléry (dirs.), *Ergonomie : 150 notions clés* (pp 59 - 62). Dunod.
- Lemonnier, S., Bouillet K. & Brémond R. (2021). Oculométrie. In E. Brangier & G. Valléry (dirs.), *Ergonomie : 150 notions clés* (pp 377 – 380). Dunod.

Communications à des colloques (avec acte) :

- Bouillet, K., Clanche, F., Lemonnier, S., & Gauchard, G. *Etude multimodale de la performance motrice et du comportement oculomoteur lors d'une tâche collaborative Homme-cobot*. 32ème Conférence Francophone sur l'interaction Homme-Machine (IHM'20-21), Metz, France, avril 2021.
- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanche, F., & Gauchard, G. *Influence de la cadence de production lors d'une situation collaborative humain-cobot sur les performances de travail et la santé des opérateurs*. 33ème Conférence Francophone sur l'interaction Humain-Machine (IHM' 23), Troyes, France, avril 2023. <https://doi.org/10.1145/3583961.3583963>
- Lemonnier, S., Cavagnac, L., Kohili, N., Bouillet, K., Maurice, P. & Mornieux, G. *Sapeurs-pompiers et désincarcération : effet du port d'une exosquelette sur la charge cognitive et l'acceptation*. 12ème Colloque EPIQUE, Paris, France, juillet 2023.
- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanche, F., & Gauchard, G. *Which repercussions of the introduction of a cobot on productivity and biomechanical constraints on operators in a collaborative task*. 14th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 23), San Francisco, California, United States of America, July 2023. <http://doi.org/10.54941/ahfe1003042>

Communications à des colloques (sans acte) :

- Bouillet, K., Clanche, F., Lemonnier, S., & Gauchard, G. *Human working in interaction with a cobot: what do its gesture, posture and gaze tell us?*. 19ème congrès international de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS), Montpellier, France, octobre 2021.

- Bouillet, K., Clanche, F., Lemonnier, S., & Gauchard, G. *A multimodal study for modelling human motor performance and health in a Human-Robotics collaborative activity*. DMOM'19 Digital Manufacturing Operations Management, Agadir, Maroc, octobre 2019.

Séminaires invités :

- « Travail face à un robot collaboratif ou face à un humain : quels impacts aux niveaux moteur et cognitif et sur les interactions entre les travailleurs ? », séminaire invité organisé par le laboratoire PICS-L (Université Gustave Eiffel, Marle la Vallée, France, 6 mai 2022).
- « Introduction d'un cobot dans une situation collaborative : quels impacts sur la performance et les facteurs humains d'un opérateur ? », séminaire invité organisé par le laboratoire PErSEUs (Université de Lorraine, Metz, France, 19 septembre 2023).

Workshops :

- Bouillet, K., Clanche, F., Lemonnier, S., & Gauchard, G. Human behaviors and Human-Robot Interaction with a cobot in a collaborative task. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Prague, Czech Republic [online], october 2021.

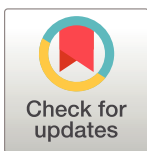
RESEARCH ARTICLE

Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task?

Kévin Bouillet^{1*}, Sophie Lemonnier², Fabien Clanche³, Gérome Gauchard^{1,3}

1 EA 3450 DevAH “Développement, Adaptation et Handicap”, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, Metz, France, **2** EA 7312 PErSEUs “Psychologie Ergonomique et Sociale pour l’Expérience Utilisateurs”, Université de Lorraine, Metz, France, **3** Faculté des Sciences du Sport, Université de Lorraine, Villers-lès-Nancy, Metz, France

* kevin.bouillet@univ-lorraine.fr



Abstract

Musculoskeletal disorders (MSDs) are the main occupational diseases and are pathologies of multifactorial origin, with posture being one of them. This creates new human-robot collaboration situations that can modify operator behaviors and performance in their task. These changes raise questions about human-robot team performance and operator health. This study aims to understand the consequences of introducing a cobot on work performance, operator posture, and the quality of interactions. It also aims to evaluate the impact of two levels of difficulty in a dual task on these measures. For this purpose, thirty-four participants performed an assembly task in collaboration with a co-worker, either a human or a cobot with two articulated arms. In addition to this motor task, the participants had to perform an auditory task with two levels of difficulty (dual task). They were equipped with seventeen motion capture sensors. The collaborative work was filmed with a camera, and the actions of the participants and co-worker were coded based on the dichotomy of idle and activity. Interactions were coded based on time out, cooperation, and collaboration. The results showed that performance (number of products manufactured) was lower when the participant collaborated with a cobot rather than a human, with also less collaboration and activity time. However, RULA scores were lower—indicating a reduced risk of musculoskeletal disorders—during collaboration with a cobot compared to a human. Despite a decrease in production and a loss of fluidity, likely due to the characteristics of the cobot, working in collaboration with a cobot makes the task safer in terms of the risk of musculoskeletal disorders.

OPEN ACCESS

Citation: Bouillet K, Lemonnier S, Clanche F, Gauchard G (2023) Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task? PLoS ONE 18(8): e0289787. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787>

Editor: Pooya Sareh, University of Liverpool, UNITED KINGDOM

Received: June 2, 2022

Accepted: July 26, 2023

Published: August 9, 2023

Peer Review History: PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787>

Copyright: © 2023 Bouillet et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All files are available from the database: https://osf.io/qq4w7/?view_only=8253c092322348c8a92b290fbd53799.

Introduction

In the annual report of the French Health Insurance on health risks [1], musculoskeletal disorders (MSDs) represent the majority of occupational diseases, accounting for nearly 90% of them. MSDs are pathologies that mainly affect the upper limbs and the back [1]. Therefore, it

Funding: The author(s) received no specific funding for this work.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

is important to prevent these MSDs. The Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS or *National Institute for Research and Safety* in English) has modeled the risk factors for MSDs [2]. MSDs result from multiple dimensions of the work environment, including biomechanical constraints (repetitiveness, posture), work organization, psychosocial factors, and stress. Repetitive tasks in awkward postures are a major risk factor. The posture of the upper limbs and the applied force are related [3,4]. Maximum force can be developed with the shoulder forward at 45°, elbow at 90°, and a neutral position of the wrist and forearm [3]. This posture also allows for better efficiency of force production. The optimal combination of angles depends on the specific task [4]. Deviating from these angles corresponds to awkward postures. Assessing the posture during workers' working time can help predict the occurrence of these disorders. The RULA assessment is generally used to evaluate the risk of developing MSDs based on the operator's posture [5].

Some devices or physical assistance robots aim to lighten the constraints on operators' posture in order to reduce the risk of developing MSDs. These devices, such as collaborative robots (cobots), aim to optimize working conditions for operators and productivity. A human-robot system is described based on workspace, working time, objective, and contacts [6]. From this, human-robot interactions are described as coexistence, cooperation, or collaboration [7], which necessarily differ from a conventional collaboration with a human. For example, communication, roles, stress, posture, or cognitive load may be different, resulting in a change in performance. The introduction of a cobot creates a new interaction, raising questions about the quality of interactions and the impact on the operator's health, including the occurrence of MSDs. This collaboration requires an adaptation of the operator's behavior, as the introduction of the cobot transforms the relationship between their task and themselves, as well as their motor activity, performance, health, and safety [8–10]. The behavior of the cobot influences production and interactions with operators. The programming of the cobot can be based on user preferences (e.g., trajectory or speed) [11], and its coordination (i.e., proactive, reactive, or adaptive) [12], as well as task characteristics (e.g., force to be applied, type of posture and operation, body part used, task complexity), can influence these parameters.

The introduction of a cobot must consider professional constraints. Considering these constraints helps maintain good fluidity in interactions between humans and the cobot, which describes the quality of interactions [13]. The actions of the robot and the human operator can be decomposed through the active and inactive dichotomy [13]. By combining the actions of each, these variables measure the fluidity of interactions, including the inactive time of the robot and the human and the concomitant activity between the two workers [13–16]. As working time is one of the factors contributing to MSDs [17], increasing the active time of operators should increase the risk of developing MSDs.

Furthermore, performing an industrial task can involve simultaneously performing another task, whether physical or cognitive, placing the individual in a dual-task situation. Performing a dual task creates interference and generally degrades performance in one or both of the tasks [18–21]. Increasing the difficulty level of one task degrades performance more than the other [22], as the more difficult task requires more attentional resources [23,24].

Recently, some studies have investigated the impact of introducing a cobot into a task to make it collaborative on production performance and operator health [25,26]. The results showed that RULA scores were lower for operators when working with the collaborative robot compared to working individually. Additionally, production performance was not degraded with the introduction of the cobot into the task. Thus, introducing a cobot into a task appears to be beneficial for the health of operators without reducing production. On the other hand, in certain industrial tasks, human-human collaboration is present, and the constraints applied to one of the co-workers might suggest the possibility of introducing a cobot to lighten the

physical constraints on one of the co-workers. To our knowledge, no study has compared human-human collaboration and human-robot collaboration for the same task in terms of production performance, operator health, or the quality of interactions.

In this regard, the aims of this study were twofold. The first was to compare the number of products manufactured in four minutes, the posture and workload of the operators, as well as the quality of interactions between a human-human system and a human-cobot system performing the same industrial task. The second was to evaluate the influence of two levels of difficulty of a second task on all parameters, by directing attentional resources to a non-contiguous task.

Material and methods

Participants

Thirty-four volunteers participated in the study, all of whom were students (13 females and 21 males; aged 22.1 ± 2.0 years). The number of participants was determined using the recommendations of Baguley [27] with a risk α of 0.05 and a power of $1 - \beta$ of 0.9. The participants were not familiar with assembly line work or working with a cobot. They had no impairments affecting motor control or attentional behavior, and their vision did not require correction. The Ethics Committee Sud Méditerranée reviewed our application on June 1st (registration number 2021-A00471-40) and stated that "Le CPP n'a pas à émettre un avis éthique sur ce type de recherche qui ne semble pas être une RIPH. Cette étude semble correspondre à des expérimentations en sciences humaines et sociales dans le domaine de la santé". All participants provided written consent prior to their participation.

Materials and tasks

Motor Task: Cobot or Human co-worker. During this experiment, participants performed a motor task in which they had to manufacture products in collaboration with a co-worker on a collaborative working plan (see Fig 1A). The products consisted of a fairing, an SFP product (aluminum product), a cover, three nuts, and three screws (see Fig 1B).

The participants and the co-worker had predefined sub-tasks in the manufacturing process. The co-worker moved the fairing onto the central base, then the participant inserted an SFP product inside it before the co-worker placed a cover on top. The participant inserted a nut

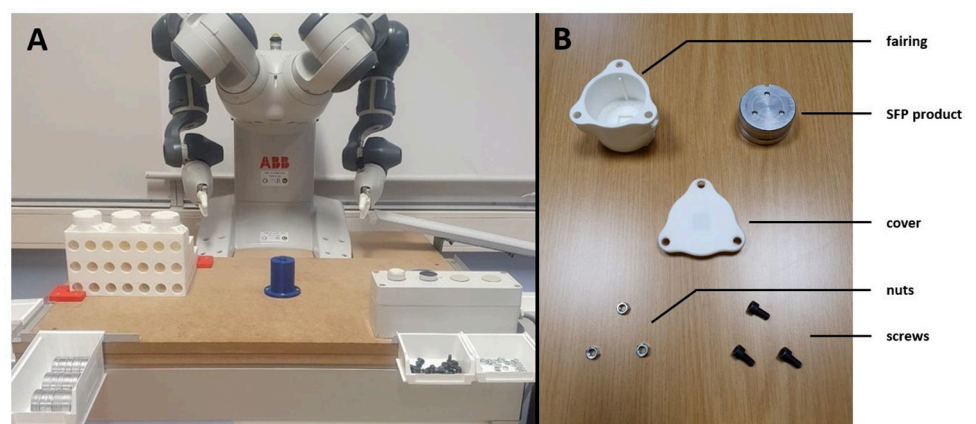


Fig 1. Working plan and components of the motor task products. (A) Working plan when a participant works with the YuMi cobot co-worker. (B) Components for manufacturing the products.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.g001>

into the fairing slot in front of them and then hand-tightened it. The co-worker rotated the product by 120° twice, and the participant performed the same operation each time. Once the product was completed, the co-worker moved the product to the unloading ramp, and then the participant and co-worker repeated all these operations to produce the next products. The different manufacturing steps are presented in [S1 Appendix](#).

The working plan consisted of three areas: co-worker area, interaction area, and participant area. Two-centimeter-thick extruded polystyrene plates were used to adjust the height of the working plan so that it was always positioned 5 to 10 cm below the participants' elbow height [28]. They were placed under the participants when necessary.

The aim of this task was to manufacture as many products as possible within four minutes (i.e., the duration of a trial). For each trial, the number of manufactured products was counted, and for the last ongoing product, the number of manufacturing steps was recorded.

As mentioned earlier, the participants had to manufacture products with a co-worker: either a cobot (COB modality) or another human (HUM modality). In the COB modality, the cobot used was a YuMi cobot (ABB Group, Zurich, Switzerland), which consists of two independent arms with seven points of articulation. Both arms are equipped with two grippers at their ends and a vacuum system at the left "wrist." During this collaboration, the production pace was led by the participants. Using a control box, they provided instructions to the cobot for it to perform its next sub-task. The cobot operated at an "automatic" speed, with the speed of arm movements limited to 1.5 m/s.

In the HUM modality, the co-worker was the same for all participants. The co-worker learned their sub-tasks and trained to work at the same speed regardless of the participant's working speed. Like the cobot, the co-worker had reactive coordination, meaning they did not anticipate the participant's actions, so they started their actions only after the participant had finished their sub-task [12], without the participants signaling that it was their turn. To make the HUM modality as similar as possible to the COB modality, verbal communication between the participants and the human co-worker was not allowed. The auditory task, which will be detailed later, controlled for this.

Auditory task. The aim of the second task was to place the participants in a dual-task situation to assess the impact of cognitive load without creating interference. Since the main task was visuomotor, this second task was auditory-verbal to avoid using the same modalities [29–31].

The auditory task was similar to the one used in Richer and Lajoie's experiment [24]. Participants listened to a four-minute audio recording of a series of letters (B, D, P, and T) announced randomly. The objective for participants was to count the number of occurrences of a predetermined letter (one of the four letters) in the recording. Participants provided their response (i.e., how many times they heard the predetermined letter) after the four-minute recording. This task had two levels of difficulty based on the inter-stimulus interval (ISI): difficult with a 2-second ISI (2s modality) and easy with a 5-second ISI (5s modality).

The letters were recorded once by a speech therapist, and then MATLAB recordings were generated using a program. Participants listened to the recording using a SoundLink II wireless headset (Bose, Framingham, MA, USA). During the task, participants were not allowed to count on their fingers, maximizing cognitive effort. Additionally, this auditory task prevented verbal communication between the two humans while they were working together.

The success rate for each condition was evaluated. Additionally, for each trial, the absolute error between the participants' response and the correct response was calculated (i.e., how much they were off by). They did not receive feedback on their response.

Video coding to describe interactions between participants and co-worker. Each four-minute trial between participants and co-worker was filmed with a QFHD Pro Series camera

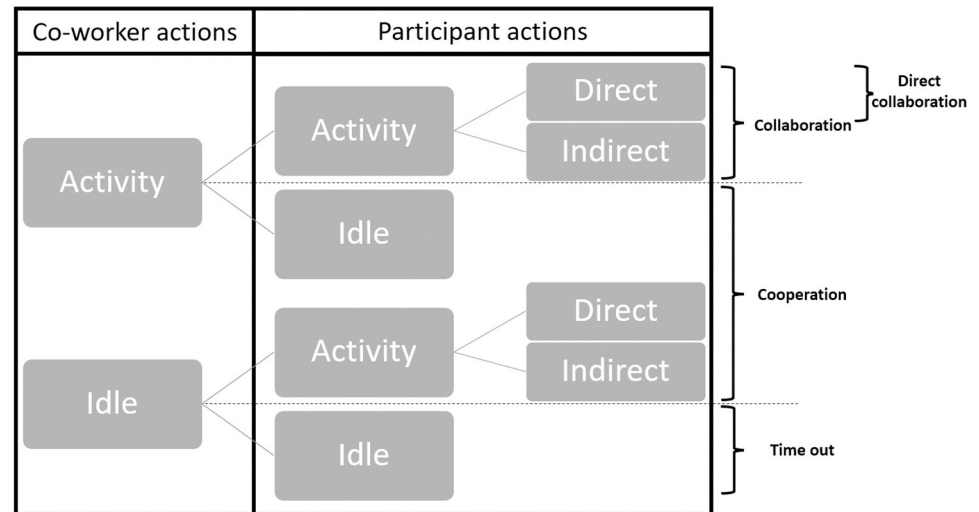


Fig 2. Action coding and distinction between the different types of interactions.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.g002>

at 15Hz (Dahua, Hangzhou, China) mounted on the wall. Then, the video recordings were exported from Smart PSS 1.13.1 software. These videos were imported into Captiv-L7000 2.3.18 software (TEA, Vandœuvre-lès-Nancy, France). Once imported, a coding was created in order to quantify the co-workers' and participants' actions.

Following Hoffmann [13], co-worker's actions and participant's actions were coded according to the "Idle" (i.e., no action on the product) and "Activity" (i.e., action on the product) dichotomy. For participant's actions, there was an additional subdivision, as in Neumann et al.'s article [32], for their "Direct activity" (i.e., motor action on the product at the central base), also known as value-adding work [32,33], and "Indirect activity" (i.e., motor action outside the central base). This coding was represented in Fig 2. All these actions were calculated as a percentage of a trial (i.e., four minutes). Co-worker "Activity" and participants' "Idle" and "Direct activity" were also measured in average duration for each action in seconds (i.e., mean duration of an action).

We propose, drawing from Hoffmann's article [13], a distinction between the different types of interactions based on the actions of the participant and the co-worker (Fig 2). When both were "Idle", there was no interaction, and it was considered as "Time out". When one of them was in "Activity" while the other was in "Idle", it was categorized as "Cooperation". When both were in "Activity", it was classified as "Collaboration", and if the participant was in "Direct activity", it was labeled as "Direct collaboration". These four interactions were expressed as a percentage of a trial.

This division allowed us to analyze the impacts of the cobot and the dual task on all measures (e.g., RULA scores, which will be explained later) according to the type of interaction. It will also enable us to be more precise in the analysis of our data and their interpretation.

Motion capture to assess the risk of developing MSDs. Participants were equipped with seventeen motion sensors of MVN Biomech Awinda wireless inertial unit type, recording at 60Hz (Xsens, Enschede, the Netherlands). These sensors were placed on the head, shoulders, sternum, pelvis, arms, forearms, hands, thighs, legs, and feet using scratch strips [34]. The sensors provide positional coordinates in the three planes of space and quaternion orientation. Using a biomechanical model integrated into Xsens MVN Animate Pro software 2021.0.0 and a MATLAB program, joint angle data were calculated in the three axes.

From this data and with a MATLAB program, a RULA assessment per side (i.e., left and right) was conducted. The method for performing the RULA assessment is explained in the article by McAtamney and Corlett [5]. The RULA score, ranging from 1 to 7, was obtained from the joint angles of one of the upper limbs (i.e., shoulder, elbow, and wrist joints), trunk, and neck. Thus, a RULA score was continuously measured.

The average score was calculated by averaging all the scores over the four minutes for each trial. The RULA score was also calculated for different actions of the participants (i.e., "Idle", "Direct activity", and "Indirect activity").

Experimental process. Participants performed all the modalities of the two tasks, resulting in four conditions: collaboration with the cobot and a 2-second ISI (COB2s); collaboration with the cobot and a 5-second ISI (COB5s); collaboration with the human and a 2-second ISI (HUM2s); collaboration with the human and a 5-second ISI (HUM5s).

For each condition, they completed three four-minute trials. Participants started either with the two COB conditions followed by the two HUM conditions, or vice versa. Within each block, they began with either three trials in the 2-second modality followed by three trials in the 5-second modality, or the reverse order.

Firstly, participants read an information document about the experiment and signed a consent form. Then, they were equipped with motion sensors on various parts of their body, as explained earlier. Once equipped, participants had to go through the calibration steps for this tool: they stood in an N-pose (standing with both arms at their sides, palms facing their bodies) for two seconds, then walked a seven-step round trip at a "normal" pace and returned to the N-pose for approximately 15 seconds.

Once the equipment and calibration with Xsens were completed, participants went through three learning phases:

First, the motor task as a single task in the COB modality: The different manufacturing steps were verbally explained to the participants, followed by the production of at least six products with the cobot co-worker, with the first two products being manufactured under the author's supervision.

Second, the auditory task as a single task in the 5-second modality: The task and its objective were explained to the participants. They then sat and listened to a learning recording, with a 5-second ISI, for four minutes, focusing on a predetermined letter. After this time, they provided their account and received feedback on their response.

Third, the dual task in the COB5s condition: After learning the two tasks in the single-task condition, participants performed a learning trial in the 5-second condition for four minutes.

When participants were fully equipped and ready to start, they positioned themselves facing the working plan and the co-worker, either a human or a cobot depending on their first condition. They completed the four conditions, with three four-minute trials for each condition, with approximately two minutes of break between two trials to arrange the different elements of the product on the working plan. To start a trial, participants placed their right hand on the central base and did not move it. The author initiated a video recording and a motion capture recording, and then participants quickly moved their right hand to press a remote control on their right side to trigger the cobot co-worker program (they simulated the same action with the human co-worker). Simultaneously, the author triggered the auditory task.

Overall, participants were present on the premises for approximately two and a half hours.

Data analysis. For all variables, tests were conducted to compare the four conditions (COB2s, COB5s, HUM2s, and HUM5s), the two modalities of the motor task (with the cobot co-worker versus with the human co-worker), and the two modalities of the auditory task (with a two-second ISI versus a five-second ISI). All statistical tests were performed using the STATISTICA software.

For performance in both tasks, the number of manufactured products (motor task) and the absolute error (auditory task) were measured. The four conditions were compared using a non-parametric repeated measures Friedman's ANOVA. When the test was significant, a Wilcoxon matched pairs test was conducted to observe significant differences between the conditions. Wilcoxon matched pairs tests were also conducted to test the differences between the two modalities of the motor task and auditory task.

For the success rate in the auditory task trials, which is a bimodal qualitative variable (success or fail), a chi-square test was performed to compare the different conditions and modalities. To assess a possible learning effect with the co-worker, the last trial and the first trial of both modalities of the motor task were compared using Wilcoxon matched pairs tests.

For all other variables (such as co-worker and participant's action times, mean times of specific actions, time of different types of interactions, RULA mean scores for each side and RULA mean scores for each side during participant's actions), intra-individual comparisons were made between conditions and modalities to assess differences. Friedman's non-parametric repeated measures ANOVA tests were conducted. When the test was significant, a Wilcoxon matched pairs test was conducted to observe significant differences between the conditions. Wilcoxon matched pairs tests were also conducted to test the differences between the two modalities of the motor task and auditory task.

RULA scores during participants' actions were compared between the three actions (Idle, Direct activity, and Indirect activity) regardless of the condition or modality. They were compared using Friedman's non-parametric repeated measures ANOVA. When the test was significant, a Wilcoxon matched pairs test was conducted to observe significant differences between the participants' actions.

Correlations were made between the three different participants' actions and with the number of manufactured products and RULA scores on both sides to observe relationships between these variables. For significant correlations, a labeling system exists to categorize r values, with $r \leq 0.35$ indicating low correlations, 0.36–0.67 indicating moderate correlations, 0.68–1.00 indicating high correlations, and $r \geq 0.9$ indicating very high correlations [35].

Data that were greater or smaller than the mean plus or minus three standard deviations were considered outliers, which were replaced with mean data for the four conditions or the two modalities [36]. Since comparisons were made using non-parametric tests, the results were expressed as median (interquartile range). The significance level α was set at 0.05.

Detailed results (i.e., mean of the trials of each variable for conditions and modalities of each participant) are available on Open Science Framework: https://osf.io/qe4w7/?view_only=8253c092322348c8a92b290fbd53799.

Results

Tasks performance

Motor task. Regarding performance in the motor task, more products were manufactured when participants worked in the HUM modality compared to the COB modality (8.03 (1.22) vs 5.35 (0.82), $p < 0.001$), but there was no difference between the 2s and 5s modalities ($p = 0.657$). The number of products manufactured differed depending on the condition ($\chi^2(3) = 82.1$, $p < 0.001$). The values and differences for the number of products manufactured in the four conditions are presented in [Table 1](#). Thus, human-human collaboration was more efficient than human-cobot collaboration.

The last trial in the COB modality (5.4 (0.9)) and HUM modality (8.4 (1.2)) was superior to the first trial of the same modalities, respectively (5.2 (0.9) and 7.3 (1.3), $p < 0.001$ for both modalities). Participants continued their learning process during trials of the same modality.

Table 1. Task performances for the four conditions.

Tasks performances	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s
Number of products manufactured	5.3 (0.6) ‡	5.3 (0.9) ‡	8.1 (1.3) §	8.0 (1.4) §
Success rate (%)	12.4 ‡	31.0 §	6.9 ‡	31.4 §
Absolute error	4.0 (2.5) ‡	1.2 (1.0) §	2.8 (2.0) #	1.2 (1.0) §

COB2s: Collaboration with the cobot and a 2-second ISI. COB5s: Collaboration with the cobot and a 5-second ISI. HUM2s: Collaboration with the human and a 2-second ISI. HUM5s: Collaboration with the human and a 5-second ISI.

‡, § or #: For a line, identical symbols indicate no difference between conditions, while different symbols indicate significant difference between conditions.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.t001>

Auditory task. During the performance of the auditory task, the success rate depended on the level of difficulty ($\chi^2(1) = 28.9, p < 0.001$), with better success in the 5s modality than in the 2s modality, but there was no difference between the COB and HUM modalities. It also depended on the conditions ($\chi^2(3) = 29.8, p < 0.001$). The values and differences for the success rate in the four conditions are presented in [Table 1](#). The absolute error in the auditory task did not differ between the COB and HUM modalities ($p = 0.289$). However, it was higher for the 2s modality than the 5s modality ($p < 0.001$). This absolute error differed depending on the condition ($\chi^2(3) = 51.9, p < 0.001$). The values and differences for the absolute error in the four conditions are presented in [Table 1](#). These results confirmed that the modalities of the auditory task corresponded to two levels of difficulty, with the 2s modality being the most difficult.

Types of actions and interactions

In this section, the results of participants' actions and co-worker's actions are described first, followed by those of the types of interactions.

Participants' actions. The participants' idle time was inversely proportional to their activity time, so only the data of their activity are presented here. Since participants' activity is also divided into direct activity and indirect activity, these data are also presented. Participants were more active in the HUM modality than in the COB modality ($p < 0.001$). Their direct activity and indirect activity were also more significant in the HUM modality than in the COB modality ($p < 0.001$ for both variables). The results showed that participants' activity time was greater in the 5s modality than in the 2s modality ($p = 0.01$). No difference was observed between the 5s and 2s modalities for direct activity ($p = 0.061$) and indirect activity ($p = 0.061$). For the three variables (i.e., activity, direct activity, and indirect activity times) the results differed according to the condition ($\chi^2(3) = 82.5, p < 0.001$; $\chi^2(3) = 82.1, p < 0.001$ and $\chi^2(3) = 46.7, p < 0.001$, respectively). These times were more significant for the HUM2s and HUM5s conditions compared to the COB2s and COB5s conditions ($p < 0.001$ for all four comparisons, with significant differences for all three variables). These results are shown in [Fig 3](#). Thus, participants were more active when working with the human co-worker than with the cobot co-worker.

The mean times of participants' idle and direct activity are also calculated. The values and differences for these times are described for the four conditions and presented in [Table 2](#). The results showed that the mean idle time of participants was longer in the COB modality than in the HUM modality (3.11s (0.99) vs. 1.93s (0.56), $p < 0.001$), while there was no difference between the 2s and 5s modalities ($p = 0.638$). This time differed depending on the condition ($\chi^2(3) = 60.4, p < 0.001$). The mean direct activity time of participants did not differ between the COB and HUM modalities ($p = 0.590$), but this mean time was more significant in the 5s modality than in the 2s modality ($p = 0.045$). This time did not differ according to the

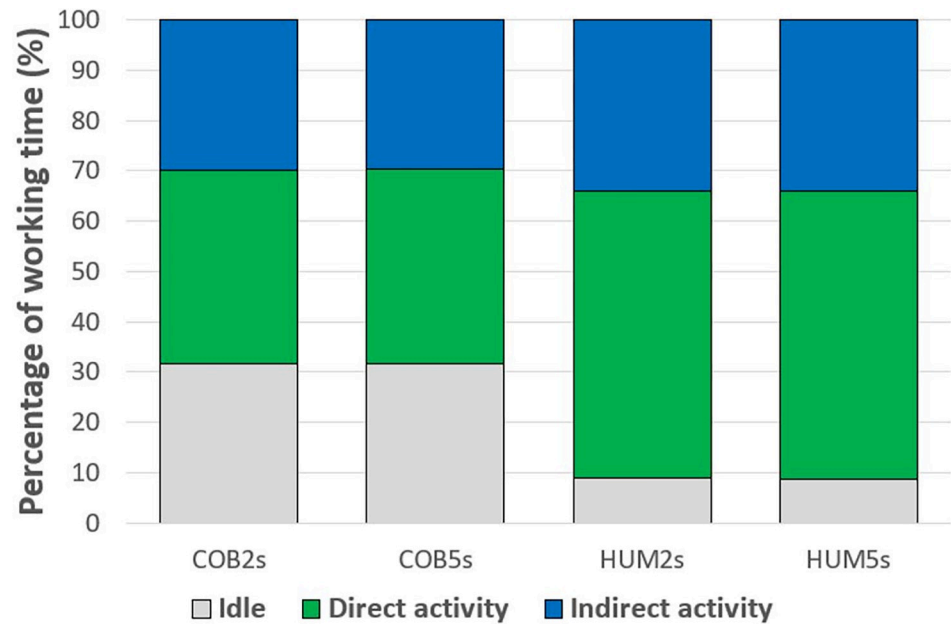


Fig 3. Distribution of different participants' actions according to the condition. COB2s: Collaboration with the cobot and a 2-second ISI. COB5s: Collaboration with the cobot and a 5-second ISI. HUM2s: Collaboration with the human and a 2-second ISI. HUM5s: Collaboration with the human and a 5-second ISI. Idle: When participants are in Idle. Direct activity: When participants are in Direct activity. Indirect activity: When participants are in Indirect activity.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.g003>

condition ($\chi^2(3) = 0.4, p = 0.950$). Therefore, participants had longer inactive periods with the cobot co-worker than with the human co-worker, and they had longer periods of direct activity with the easiest level of difficulty in the auditory task.

Co-worker's actions. As the co-worker's activity time was inversely proportional to its idle time, only the data of its activity are presented here. The cobot co-worker was more active than the human co-worker (36.1% (9.0) vs. 30.7% (5.1), $p < 0.001$), while there was no difference in the co-worker's activity time between the 2s and 5s modalities ($p = 0.844$). The results showed differences in the co-worker's activity time depending on the condition ($\chi^2(3) = 62.1, p < 0.001$), with greater activity times for the HUM2s and HUM5s conditions compared to the COB2s and COB5s conditions ($p < 0.001$ for all four comparisons with significant differences).

Additionally, the cobot co-worker's mean activity time was more significant than that of the human co-worker ($p < 0.001$), but there was no difference in the co-worker's mean activity

Table 2. Participant mean Idle and Direct activity times and co-worker mean Idle time.

	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s
Participant mean Idle time (s)	3.3 (0.9) ‡	3.2 (1.1) §	1.9 (0.6) #	1.9 (0.5) #
Participant mean direct activity time (s)	4.1 (0.8)	4.1 (0.8)	4.1 (1.1)	4.2 (1.0)
Co-worker mean Idle time (s)	3.8 (1.3) ‡	3.8 (1.3) ‡	2.2 (0.5) §	2.2 (0.6) §

COB2s: Collaboration with the cobot and a 2-second ISI. COB5s: Collaboration with the cobot and a 5-second ISI. HUM2s: Collaboration with the human and a 2-second ISI. HUM5s: Collaboration with the human and a 5-second ISI.

‡, § or #: For a line, identical symbols indicate no difference between conditions, while different symbols indicate significant difference between conditions. No symbol indicates that there is no significant difference between the four conditions for a line.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.t002>

Table 3. Times of the types of interactions between the participant and the co-worker (% of a trial).

Type of interactions	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s
Time out	9.7 (5.3) ‡	9.4 (5.0) ‡	0.9 (1.4) §	1.0 (0.7) §
Cooperation	73.7 (4.3)	73.3 (4.7)	74.7 (3.6)	73.9 (4.4)
Collaboration	17.0 (7.2) ‡	17.4 (8.1) ‡	24.1 (4.5) §	25.0 (5.4) §
Direct collaboration	1.9 (2.8)	3.0 (3.5)	1.6 (3.3)	2.0 (4.7)

COB2s: Collaboration with the cobot and a 2-second ISI. COB5s: Collaboration with the cobot and a 5-second ISI. HUM2s: Collaboration with the human and a 2-second ISI. HUM5s: Collaboration with the human and a 5-second ISI.

‡ or §: For a line, identical symbols indicate no difference between conditions, while different symbols indicate significant difference between conditions. No symbol indicates that there is no significant difference between the four conditions for a line.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.t003>

time between the 2s and 5s modalities ($p = 0.966$). This mean time differed between conditions ($\chi^2(3) = 62.1, p < 0.001$). The values and differences for this time are described for the four conditions and presented in [Table 2](#).

Thus, the cobot co-worker was more active, with longer activities, than the human co-worker, without any interactions with the modalities of the auditory task.

Interactions between participant and co-worker. The results showed that there were more "Time out" occurrences in the COB modality than in the HUM modality ($p < 0.001$), but there was no difference between the 2s and 5s modalities ($p = 0.752$). The occurrence of "Time out" varied depending on the condition ($\chi^2(3) = 72.6, p < 0.001$). The results and differences are presented in [Table 3](#). Regarding cooperation time, there was no difference between the COB and HUM modalities ($p = 0.114$) and between the 2s and 5s modalities ($p = 0.256$). However, the results showed differences between conditions ($\chi^2(3) = 11.5, p = 0.009$). The results and differences are presented in [Table 3](#).

Collaboration time was higher in the HUM modality than in the COB modality (24.45% (4.73) vs 17.16% (7.70), $p < 0.001$). However, the results showed no difference between the COB and HUM modalities for direct collaboration ($p = 0.925$). The results showed that collaboration time did not differ between the 2s and 5s modalities, whereas direct collaboration time was higher in the 5s modality than in the 2s modality ($p = 0.014$). Collaboration time varied depending on the condition ($\chi^2(3) = 72.6, p < 0.001$). These results and differences are presented in [Table 3](#).

Thus, when participants worked with the cobot co-worker, there were more "Time out" occurrences but less collaboration compared to when participants worked with the human co-worker.

Biomechanical behavior: RULA evaluation

Throughout each trial, a RULA assessment was conducted to continuously evaluate the risk of developing MSDs. A RULA score is a discrete value between 1 and 7, with higher scores indicating a greater risk of developing MSDs. Thus, for each trial, the average RULA score was calculated, as well as the mean RULA scores during different participant actions (i.e., Idle, Direct activity, and Indirect activity). The analysis was performed for both the right and left sides. The results for the mean RULA score are described first, followed by RULA scores for participant actions, and finally, a comparison between the three RULA scores during participant actions, irrespective of the conditions.

RULA score. The mean RULA score was higher for participants in the HUM modality (3.61 (0.44) for the right side and 3.95 (0.44) for the left side) compared to the COB modality (3.40 (0.46) for the right side and 3.62 (0.58) for the left side) for both sides ($p < 0.001$ for both

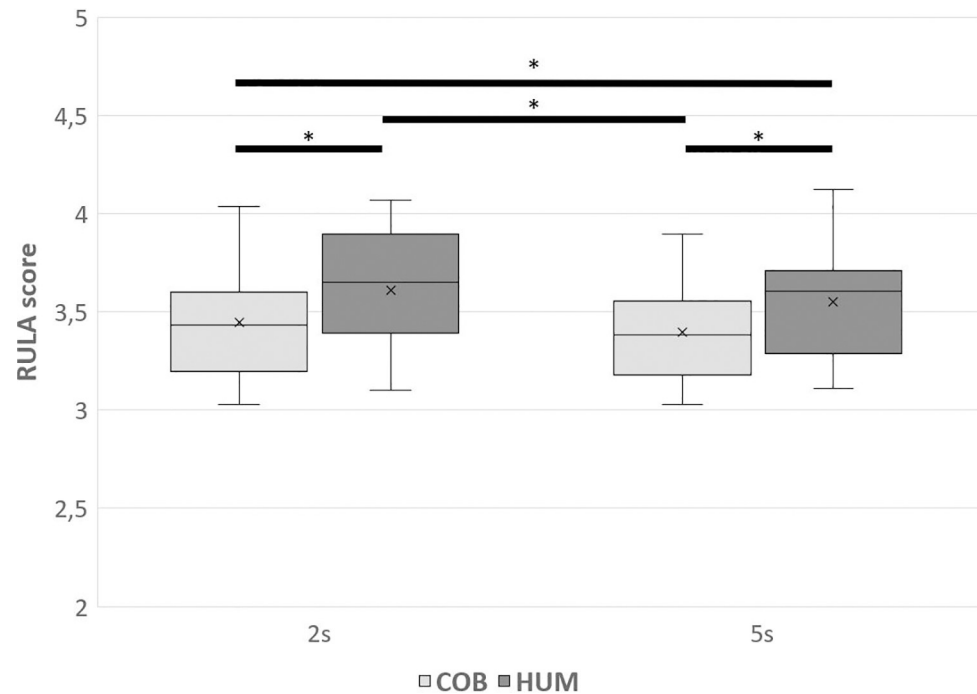


Fig 4. Mean RULA scores for the right side. COB: Collaboration with the cobot. HUM: Collaboration with the human. 2s: Two-second ISI. 5s: Five-second ISI. * significant difference between conditions.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.g004>

sides). A significant difference was observed between the 2s and 5s modalities for the right side, with a higher RULA score for the 2s modality ($p = 0.045$), but there was no difference for the left side ($p = 0.521$). The mean RULA score differed depending on the condition for both sides ($\chi^2(3) = 27.1$, $p < 0.001$ for the right side and $\chi^2(3) = 26.9$, $p < 0.001$ for the left side), with higher scores in the HUM2s and HUM5s conditions compared to COB2s and COB5s (for the left side: $p < 0.001$ for all comparisons with significant differences; for the right side: Fig 4). Results of the four conditions for the right side are shown in Fig 4. It should be noted that the RULA score was higher for the left side than the right side, regardless of the conditions ($p < 0.001$).

RULA score during participant's actions. When participants were Idle, the RULA score was higher in the HUM modality than in the COB modality ($p < 0.001$ for the right side and $p = 0.011$ for the left side). However, there was no difference between the 2s and 5s modalities. The RULA score during Idle differed depending on the condition ($\chi^2(3) = 26.7$, $p < 0.001$ for the right side and $\chi^2(3) = 14.2$, $p = 0.003$ for the left side). This score was higher in the COB2s and COB5s conditions than in the HUM2s and HUM5s conditions (right side: Table 4; left side: $p < 0.001$ for HUM2s and COB2s, $p = 0.013$ for HUM2s and COB5s), except between HUM5s and COB2s ($p = 0.052$) and for HUM5s and COB5s ($p = 0.054$) for the left side.

When participants were in Direct activity, the RULA score was higher in the HUM modality than in the COB modality ($p < 0.001$ for the right side and $p = 0.019$ for the left side). This score was also higher in the 2s modality than in the 5s modality for the right side ($p = 0.032$), but there was no difference for the left side ($p = 0.397$). The RULA score during Direct activity differed depending on the condition ($\chi^2(3) = 21.9$, $p < 0.001$ for the right side and $\chi^2(3) = 15.1$, $p < 0.002$ for the left side). The results and differences are indicated in Table 4. For the left side, the score was higher for HUM2s compared to the COB2s condition ($p = 0.014$) and COB5s condition ($p = 0.021$).

Table 4. RULA mean scores during the three participants' actions for the right side.

Participants' actions	COB2s	COB5s	HUM2s	HUM5s
Idle	3.29 (0.40) ‡	3.26 (0.34) ‡	3.50 (0.40) §	3.37 (0.40) §
Direct activity	3.45 (0.54) ‡	3.39 (0.53) ‡	3.64 (0.55) §	3.57 (0.54) §
Indirect activity	3.55 (0.32) ‡	3.48 (0.35) ‡	3.68 (0.51) §	3.62 (0.45) §

COB2s: Collaboration with the cobot and a 2-second ISI. COB5s: Collaboration with the cobot and a 5-second ISI. HUM2s: Collaboration with the human and a 2-second ISI. HUM5s: Collaboration with the human and a 5-second ISI.

‡ or §: For a line, identical symbols indicate no difference between conditions, while different symbols indicate significant difference between conditions.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.t004>

When participants were in Indirect activity, the RULA score was higher in the HUM modality than in the COB modality ($p < 0.001$ for the right side and $p = 0.004$ for the left side). No difference between the 2s and 5s modalities was observed. The RULA score during Indirect activity differed according to the conditions ($\chi^2(3) = 19.4$, $p < 0.001$ for the right side and $\chi^2(3) = 21.9$, $p < 0.001$ for the left side) with a higher score for the COB2s and COB5s conditions than for the HUM2s and HUM5s conditions (for the right side: [Table 4](#); for the left side: $p = 0.005$ for COB2s and HUM2s, $p = 0.001$ for COB5s and HUM2s, $p = 0.003$ for COB5s and HUM5s, and $p = 0.012$ for COB2s and HUM5s).

Comparisons between RULA scores during the participants' actions. For both sides, the RULA scores of the different participants' actions were compared independently of the condition. The results showed that the RULA score was highest when participants were in Direct activity and lowest when they were idle ($p < 0.001$ for all comparisons and for both sides, see [Fig 5](#) for the right side, the patterns are similar for the left side).

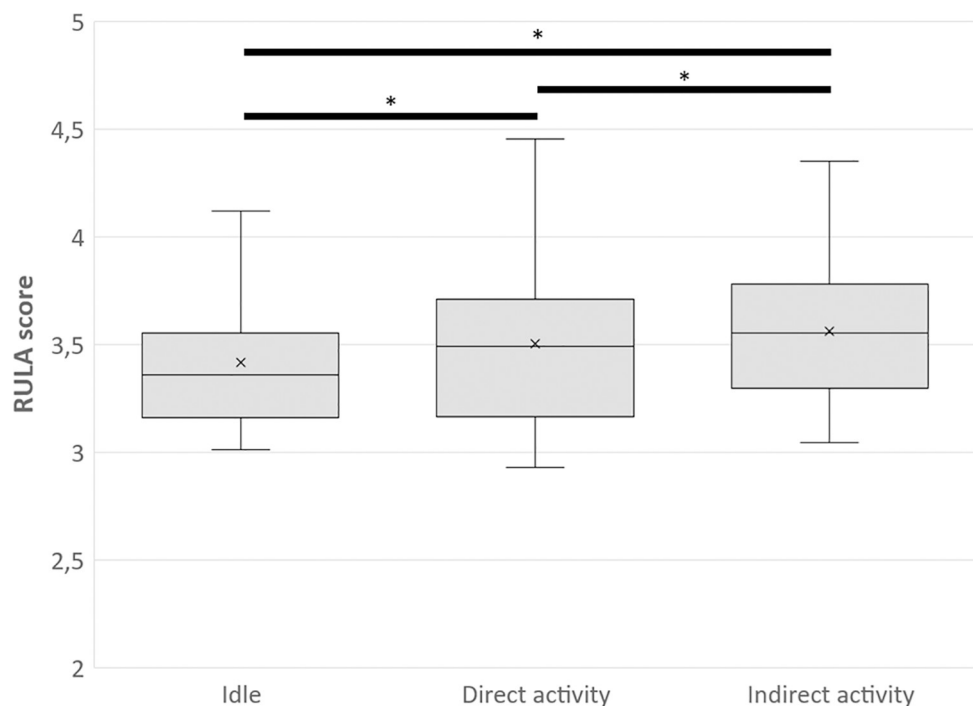


Fig 5. RULA mean score for the right side during the three participants' actions. Idle: When participants are in Idle. Direct activity: When participants are in Direct activity. Indirect activity: When participants are in Indirect activity. The comparisons are made independently of the condition. * significant difference between conditions.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289787.g005>

Correlations

Regarding the number of products manufactured and participants' actions, the first one was strongly correlated with their Activity ($r = 0.815$, $p < 0.001$), their Direct activity ($r = 0.715$, $p < 0.001$), and weakly with the mean time spent in Direct activity ($r = -0.219$, $p = 0.010$).

Furthermore, the number of products manufactured was correlated with the collaboration time between participants and their co-worker ($r = 0.599$, $p < 0.001$). Participants' Activity was highly correlated with their Direct activity ($r = 0.913$, $p < 0.001$), and moderately with the mean time spent in Direct activity ($r = 0.248$, $p = 0.004$). Direct activity was weakly correlated with the mean time spent in Direct activity ($r = 0.421$, $p < 0.001$).

Low correlations were observed between the number of products manufactured and the mean RULA score for each side ($r = 0.2$, $p = 0.020$ for the right side and $r = 0.251$, $p = 0.003$ for the left side).

Mean RULA scores were also correlated with participants' actions: their Activity ($r = 0.259$, $p = 0.002$ for the right side and $r = 0.372$, $p < 0.001$ for the left side), their Direct activity ($r = 0.364$, $p < 0.001$ for the right side and $r = 0.429$, $p < 0.001$ for the left side), and weakly with the mean time of Direct activity ($r = 0.255$, $p = 0.003$ for the right side and $r = 0.25$, $p = 0.003$ for the left side).

Discussion

This study aimed to understand the consequences of collaborative human-robot interactions during assembly work of parts (traditional machining task) on the same working plan.

Performance at tasks

The results showed that the mode of collaboration has an impact on the production rate. Specifically, the production rate was 50% higher between two humans compared to between a human and the YuMi cobot in this experiment. In previous studies, the introduction of a cobot in an individual task to make it collaborative did not impact productivity [25,26]. Furthermore, participants in those studies benefited from a modification of the working plan and a new distribution of different tasks. In our experiment, the distribution of tasks was similar for participants, so production was not optimized with the collaborative cobot.

In our experiment, the difference in production can be explained by the actual working time of the participants (Activity), as well as the time spent working at the central station (Direct activity), and indirectly by the higher quality of interactions (Collaboration). The more active the participants were, the more products were manufactured. The differences in activity time facing the cobot and the other human can be explained by two factors: production waiting time and the execution speed of the cobot, which was slower than that of the human due to the imposed standards (including limited arm movement speed of 1.5 m/s). Additionally, the human co-worker was asked not to anticipate the end of participants' actions, so the human co-worker started their actions faster than the cobot, particularly due to the need to use the interface to transmit information to the cobot and their reaction time. Despite the reactive coordination of the human co-worker, their reaction time was better. The human co-worker had to exhibit reactive coordination, which is not natural for humans who tend to have proactive coordination [12]. With proactive coordination, performance should be better for collaboration between two humans. Unlike the cobot, humans, with their perceptual abilities, especially gaze, can determine the beginning of their action relative to the end of their co-worker's action, which increases interaction fluidity [14] and collaboration efficiency [37]. When the robot is capable of anticipating human actions, unlike in our experiment, interaction fluidity is improved by reducing waiting time and increasing simultaneous activity time [14], which improves the production rate.

Regarding the auditory task, its modalities corresponded to two levels of difficulty, with the 2s modality being more difficult than the 5s modality [23,24]. Our results showed that the success rate was higher when the ISI was five seconds (31.2% of trials with a correct response to the auditory task) compared to the two-second ISI (9.5%). Moreover, the mean absolute error was lower in the 5s modality, regardless of the mode of collaboration. This auditory task is defined as a continuous task where the two modalities effectively correspond to two levels of difficulty, as in the studies by Richer and Lajoie (2019) and Polskaia and Lajoie (2016) [23,24]. Furthermore, in these two previous studies, their results indicated a comparable performance difference to our experiment but also showed a higher perceived difficulty for the 2s modality. However, their success rates were much higher than in this experiment, but their main task was a postural task that required less attention than the motor task of product manufacturing, allowing for more attentional resources to be allocated to the auditory task.

According to the distinction made by Al-Yahya and colleagues in 2011 [21], there are five types of cognitive tasks in dual-task experiments. Here, the auditory task, which is a cognitive task, corresponds to a working memory task (WMT). WMTs "refer to tasks that require holding information in memory available for processing" [21]. To assess the impact of one task on another, a dual-task cost is evaluated by comparing performance in single-task and dual-task conditions [18,19]. Nearly all dual-task studies with a WMT as a secondary task focused on easy and automated primary tasks, such as postural control with improvement [23,24] or walking with modification of spatiotemporal parameters [21,38–41]. For activities involving the upper limbs, the motor task was generally simple, requiring few degrees of freedom and being repetitive [42,43]. In those studies, results were contradictory, with performance being either degraded or not degraded. Regarding a more complex motor task [44], the automation of it reduced the impact of the secondary task on performance. In our study, the motor task was complex, requiring multiple coordinated movements in space and time in coordination with a co-worker, while the cognitive task (auditory task here) was a WMT. To our knowledge, the results of our experiment align with the first ones comparing the results of a complex motor task with a working memory task.

Thus, the production rate was only impacted by the mode of collaboration and not by the difficulty level of the auditory task. Furthermore, the performance of the auditory task was impacted by difficulty level but not by the mode of collaboration. However, when the auditory task was difficult (i.e., 2-second ISI), the performance of the auditory task was impacted by the mode of collaboration, with degradation in the COB condition (i.e., higher absolute error) compared to the HUM condition. The auditory task required more attentional resources, which appeared to be less available when participants were facing the cobot than when facing the other human. This could indicate an increased need for attentional resources with a cobot. The motor task was not automated in this experiment, as a learning effect was observed regardless of the mode of collaboration, with a greater number of products manufactured in the last trial compared to the first. Due to this lack of automation, the cognitive demand was not negligible for the motor task [45]. The difference in resource requirements for the motor task based on the mode of collaboration would not be sufficient to impact the performance of the auditory task. However, they could be impacted when the amount of attentional resources required for the auditory task is greater [46]. These results raise questions about the amount of attentional resources required in the two modes of collaboration.

Quality of the interactions

The subtasks were distributed sequentially between the two entities. When a participant finished a subtask, or was in the process of finishing one, it was the co-worker's turn to execute

theirs, and vice versa. In this collaboration, the actions of the cobot or the human co-worker corresponded to the active-inactive dichotomy. Whether it was a cobot or another human, the co-worker was mostly inactive, but even more so when it was a human (69.2% of working time) than when it was with the cobot (62.7% of working time). As for the participants, in the same dichotomy, they were overwhelmingly active, especially when working with a human (91.4% of working time) than with the cobot (69.4% of working time). The distribution of working time was therefore unequal between the two entities of the collaboration. Even with reactive coordination for the human co-worker, the participants' idle time was reduced compared to the cobot co-worker. With proactive coordination, which is more natural for humans, the reduction of this idle time with a human co-worker has already been demonstrated [47].

Focusing more specifically on the Direct activity and Indirect activity dichotomy, participants were also more active at the central base, directly on the product, when facing the cobot compared to the other human (38.1% of working time vs. 56.8% respectively). However, the mode of collaboration had no effect on the average duration of a direct activity. Thus, participants took the same amount of time to perform their subtasks at the central base. Their execution speed was not affected either by the presence of the robot or by the speed of action of the co-worker, which was faster when it was a human. This speed could be influenced by the co-worker's speed [48], a phenomenon known as motor contagion. This has been observed in human-human interactions [49–51] as well as in human-robot interactions [49,52], although there have been few studies in this area. The increase in activity time at the central base was therefore linked to the number of actions participants performed during their working time. In fact, this direct activity time was correlated with the number of products manufactured.

A cobot, as a collaborative robot, differs from a traditional robot in its ability to collaborate with a human, being close to them in terms of safety [7]. In this work situation, the combination of actions from each entity [13] distinguishes two types of interactions between the two entities: cooperation, where one worker acts while the other waits, and collaboration, where both act simultaneously. The objective of this study was to compare the collaboration times with a cobot co-worker and a human co-worker. The results showed a longer collaboration time when facing the cobot compared to facing the other human, which might explain the increase in production, as the number of products manufactured and the collaboration time were correlated. Changing the cobot's coordination to be proactive [12] would enhance this hybrid collaboration to improve fluency and thus increase productivity [14,37]. Despite the distinction made in this study between cooperation and collaboration, interactions between participants and the co-worker could be considered as collaboration according to certain definitions. Indeed, according to Hentout and colleagues [7], collaboration corresponds to the accomplishment of a complex task with direct physical interactions or without contact, which was the case in this complex motor task due to the distribution of subtasks and the necessary coordination between participants and the co-worker, with constant proximity between the two throughout the assembly process.

Risk of developing MSDs

An ongoing RULA assessment was conducted to quantify the risk of developing MSDs. The RULA score corresponds to a discrete value between one and seven, where the higher the score, the greater the risk. The average score was lower when the participant worked with the cobot coworker compared to the human coworker, with a reduction of 5.0% for the right side and 5.7% for the left side. A decrease in score was also observed when introducing a cobot in an individual work situation in a recent case study [25]. However, with the introduction of the cobot, an ergonomic study was conducted to optimize the operator's posture and reduce this risk.

RULA evaluations use scores to measure the risk of developing MSDs. They utilize optimal angles of upper limb joints as a lower score for articulation, and as one deviates from these angles, the scores increase [3,4]. Thus, the lower RULA scores observed with the cobot indicate that muscular activation could be reduced when working with the cobot coworker compared to the human coworker, thereby reducing the risk of developing MSDs.

The RULA assessment indicated that the risk of developing MSDs was higher when the participants were active, and even more so when they were working at the central base. When participants were inactive, despite the non-value adding activity for the products, it served as a recovery time. Delaying this rest time for the workers implies a higher risk for MSDs [53]. However, regardless of the participants' actions (i.e., inactivity, direct activity, or indirect activity), the RULA score was higher with the human coworker. This score seemed surprising when the participants were inactive, as they were not doing anything and were in a waiting situation. The working plan had been designed to be at the same height for both modes of collaboration, respecting the best ergonomic height [28]. However, their average idle times differed depending on the coworker, being shorter when facing a human compared to the cobot. The idle time can represent a rest period for participants. Since the rest time was shorter with the human coworker, participants had less time and might be ready for the next subtask, indicating they were not in a state of rest.

However, it should be noted that this score, for both sides, was slightly correlated with the number of products. Thus, the RULA score and the activity time might increase when production performance increases. Future studies could investigate the relationship between these variables. The production rate was determined by the participants, and they were free to work at their own pace without time constraints or objectives. But what would happen to this score if a specific cadence was imposed? Or what if the participant is no longer the leader and is guided by the cobot? Further studies could explore these questions, especially when the cadence is controlled at a different speed by the cobot rather than the operator.

Study limitation: A laboratory study. One major limitation of this study is that the experiment did not take place in a fully ecological context. Indeed, the experiment was conducted in a laboratory with participants who were not experienced in assembly line work or working with a cobot.

Despite choosing a collaborative work situation that required human presence [54] and high-level interactions between workers [7], the task was performed in a laboratory without a real performance objective. Thus, the behaviors for the participants were not the same as for operators working in a production line [55].

From a health and posture perspective, the participants in our study were young and did not match the typical profile of people affected by musculoskeletal disorders (TMS): individuals aged between 40 and 60 with experience in repetitive tasks [1]. Furthermore, the attitude of a participant in our study differs from that of an industry worker when interacting with a cobot [56], particularly due to the operator's experience influencing their behavior.

Finally, posture studies were conducted on short-duration recordings. In total, the participants worked for less than an hour, while the onset of TMS occurs over the long term with the repetition of movements in awkward postures [2]. Thus, the risks are calculated if the person repeats the same task continuously for much longer periods (i.e., several hours and several days), without considering certain organizational factors such as job rotation during a day [57].

Therefore, it would be interesting to transpose this study to a population of operators performing a task in interaction with a cobot in a real collaborative work situation over longer durations to assess production performance and the long-term impact on the operators' health.

Conclusion

The introduction of the cobot co-worker reduces productivity compared to a human co-worker in this collaborative work situation. This decrease in performance is linked to a deterioration in the fluidity of the interaction, with more waiting time at the expense of working time on the product or collaboration between the two workers. However, the risk of developing MSDs is reduced with the presence of the cobot for operators in this collaborative situation. Despite the absence of an impact of the auditory task, the second task here, on production performance, increasing the difficulty of the second task reduces the amount of attentional resources and degrades the fluidity of the interaction, thereby increasing the risk of developing MSDs. Therefore, to evaluate an operator in a given workstation, it is necessary to consider all tasks, both motor and cognitive, and not just performance in their specific task, but also all human factors that could be influenced by the introduction of a cobot and the new system. Before introducing a cobot in a specific work situation, it is necessary to quantify the gains and costs of this introduction on production performance and operator factors.

Supporting information

S1 Appendix. Different steps to manufacture products. Here a participant is working with the cobot co-worker. A- Participant press the button on the transmitter; B- Participant inserts an SFP product into the fairing; C- He inserts the first nut; D- Participant screws for the second time; E- He screws for the third time; F- Cobot co-worker evacuates the product and brings the next fairing to the central base. The individual in this manuscript has given written informed consent (as outlined in PLOS consent form) to publish these case details. (TIF)

Acknowledgments

We are grateful to AIP Lorrain, in particular its director Muriel Lombard, to welcome us in its premises. We thank also Christian Ulrich Tchounke Lonang and Hugo Portejoie for their technical support and the speech language therapist Amélie Dumont for the recording of the letters of the auditory task.

Author Contributions

Conceptualization: Kévin Bouillet, Sophie Lemonnier, Fabien Clanche, G erome Gauchard.

Data curation: K evin Bouillet.

Formal analysis: K evin Bouillet.

Funding acquisition: K evin Bouillet.

Investigation: K evin Bouillet.

Methodology: K evin Bouillet, Sophie Lemonnier, Fabien Clanche.

Project administration: Sophie Lemonnier, G erome Gauchard.

Resources: K evin Bouillet, Sophie Lemonnier, G erome Gauchard.

Software: K evin Bouillet, Fabien Clanche.

Supervision: K evin Bouillet, Sophie Lemonnier, G erome Gauchard.

Validation: K evin Bouillet, Sophie Lemonnier.

Visualization: K evin Bouillet, Fabien Clanche.

Writing – original draft: Kévin Bouillet.

Writing – review & editing: Sophie Lemonnier, Gérôme Gauchard.

References

1. L'Assurance Maladie. Rapport annuel 2020—L'Assurance Maladie—Risques professionnels. L'Assurance Maladie; 2021 pp. 1–170.
2. Uguen C, Sablon S, Carballeda G. Intégration de la préparation physique dans l'approche ergonomique: quel dispositif pour quel(s) objectif(s)? *Activités*. 2018; 15: 1–34. <https://doi.org/10.4000/activites.3537>
3. Jain R, Meena ML, Sain MK, Dangayach GS. Impact of posture and upper-limb muscle activity on grip strength. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2019; 25: 614–620. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1501972> PMID: 30024311
4. Roman-Liu D, Tokarski T. Upper limb strength in relation to upper limb posture. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2005; 35: 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.07.002>
5. McAtamney L, Corlett EN. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl Ergon*. 1993; 24: 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-s](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-s) PMID: 15676903
6. Bortot D. Ergonomic human-robot coexistence in the branch of production. PhD Thesis, Technische Universität München. 2014. Available: https://mediatum.ub.tum.de/1177024?style=full_standard.
7. Hentout A, Aouache M, Maoudj A, Akli I. Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017. *Adv Robot*. 2019; 33: 764–799. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
8. Müller SL, Stiehm S, Jeschke S, Richert A. Subjective stress in hybrid collaboration. In: Kheddar A, Yoshida E, Ge SS, Suzuki K, Cabibihan J-J, Eyssel F, et al., editors. *Social Robotics*. Cham: Springer International Publishing; 2017. pp. 597–606.
9. Charpentier P, Sghaier A. L'homme au travail et le robot: une relation à inventer. *Hyg Sécu Trav*. 2013; 231: 84–88.
10. Murashov V, Hearl F, Howard J. Working safely with robot workers: Recommendations for the new workplace. *J Occup Environ Hyg*. 2016; 13: 61–71. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1116700> PMID: 26554511
11. Roveda L, Maggioni B, Marescotti E, Shahid AA, Maria Zanchettin A, Bemporad A, et al. Pairwise Preferences-Based Optimization of a Path-Based Velocity Planner in Robotic Sealing Tasks. *IEEE Robot Autom Lett*. 2021; 6: 6632–6639. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3094479>
12. Huang C-M, Cakmak M, Mutlu B. Adaptive coordination strategies for Human-robot handovers. *Robotics: science and systems*. Roma; 2015. pp. 1–10. Available: <http://m.roboticsproceedings.org/rss11/p31.pdf>.
13. Hoffman G. Evaluating fluency in human–robot collaboration. *IEEE Trans Hum Mach Syst*. 2019; 49: 209–218. <https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2904558>
14. Hoffman G, Breazal C. Cost-based anticipatory action selection for human-robot fluency. *IEEE Trans Robot*. 2007; 23: 952–961. <https://doi.org/10.1109/TRO.2007.907483>
15. Baraglia J, Cakmak M, Nagai Y, Rao R, Asada M. Initiative in robot assistance during collaborative task execution. 2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Christchurch, New Zealand: IEEE; 2016. pp. 67–74. <https://doi.org/10.1109/HRI.2016.7451735>
16. Nikolaidis S, Kwon M, Forlizzi J, Srinivasa S. Planning with Verbal Communication for Human-Robot Collaboration. *ACM Trans Hum Robot Interact*. 2018; 7: 1–21. <https://doi.org/10.1145/3203305>
17. Caroly S, Major M-E, Probst I, Molinié A-F. Le genre des troubles musculo-squelettiques: Interventions ergonomiques en France et au Canada. *Travail Genre Sociétés*. 2013; 29: 49–67. <https://doi.org/10.3917/tgs.029.0049>
18. Friedman A, Polson MC, Dafoe CG, Gaskill SJ. Dividing attention within and between hemispheres: Testing a multiple resources approach to limited-capacity information processing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 1982; 8: 625–650. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.8.5.625> PMID: 6218226
19. Worden TA, Mendes M, Singh P, Vallis LA. Measuring the effects of a visual or auditory Stroop task on dual-task costs during obstacle crossing. *Gait Posture*. 2016; 50: 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.033> PMID: 27621085

20. Bank PJM, Marinus J, van Tol RM, Groeneveld IF, Goossens PH, de Groot JH, et al. Cognitive-motor interference during goal-directed upper-limb movements. *Eur J Neurosci*. 2018; 48: 3146–3158. *European Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1111/ejn.14168> PMID: [30251278](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30251278/)
21. Al-Yahya E, Dawes H, Smith L, Dennis A, Howells K, Cockburn J. Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev*. 2011; 35: 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008> PMID: [20833198](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20833198/)
22. Leonhard T, Fernández SR, Ulrich R, Miller J. Dual-task processing when task 1 is hard and task 2 is easy: Reversed central processing order? *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2011; 37: 115–136. <https://doi.org/10.1037/a0019238> PMID: [20718575](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20718575/)
23. Polskaia N, Lajoie Y. Interstimulus intervals and sensory modality modulate the impact of a cognitive task on postural control. *J Mot Behav*. 2016; 48: 482–488. <https://doi.org/10.1080/00222895.2015.1134435> PMID: [27253424](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27253424/)
24. Richer N, Lajoie Y. Cognitive task modality influences postural control during quiet standing in healthy older adults. *Aging Clin Exp Res*. 2019; 31: 1265–1270. <https://doi.org/10.1007/s40520-018-1068-9> PMID: [30414089](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30414089/)
25. Gualtieri L, Palomba I, Merati FA, Rauch E, Vidoni R. Design of Human-centered collaborative assembly workstations for the improvement of operators' physical ergonomics and production efficiency: A case study. *Sustainability*. 2020; 12: 3606–3628. <https://doi.org/10.3390/su12093606>
26. Colim A, Faria C, Cunha J, Oliveira J, Sousa N, Rocha LA. Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics. *Safety*. 2021; 7: 14. <https://doi.org/10.3390/safety7010014>
27. Baguley T. Understanding statistical power in the context of applied research. *Applied Ergonomics*. 2004; 35: 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.01.002> PMID: [15105068](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15105068/)
28. CUSSTR. Aménagement général des postes de travail. Commission Universitaire de Sécurité et santé au Travail Romande (CUSSTR); 2005 pp. 27–41. Available: <http://cusstr.ch/repository/10.pdf>.
29. Bardy BG. Le paradigme de la double tâche. *Science et motricité*. 1991; 15: 31–39.
30. Kelly VE, Janke AA, Shumway-Cook A. Effects of instructed focus and task difficulty on concurrent walking and cognitive task performance in healthy young adults. *Exp Brain Res*. 2010; 207: 65–73. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2429-6> PMID: [20931180](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20931180/)
31. Weerdesteyn V, Schillings AM, Van Galen GP, Duysens J. Distraction affects the performance of obstacle avoidance during walking. *J Mot Behav*. 2003; 35: 53–63. <https://doi.org/10.1080/00222890309602121> PMID: [12724099](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12724099/)
32. Neumann WP, Winkel J, Medbo L, Magneberg R, Mathiassen SE. Production system design elements influencing productivity and ergonomics: A case study of parallel and serial flow strategies. *Int J Operations Prod Manage*. 2006; 26: 904–923. <https://doi.org/10.1108/01443570610678666>
33. Liker JK. *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. New York: McGraw-Hill; 2004.
34. Schepers M, Giuberti M, Bellusci G. Xsens MVN: Consistent tracking of human motion using inertial sensing. 2018 pp. 1–8. Available: https://www.researchgate.net/profile/Martin-Schepers/publication/324007368_Xsens_MVN_Consistent_Tracking_of_Human_Motion_Using_Inertial_Sensing/links/5ab8be2f0f7e9b68ef51f7ba/Xsens-MVN-Consistent-Tracking-of-Human-Motion-Using-Inertial-Sensing.pdf.
35. Taylor R. Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *J Diagn Med Sonogr*. 1990; 6: 35–39. <https://doi.org/10.1177/875647939000600106>
36. Rustum R, Adeloye AJ. Replacing Outliers and Missing Values from Activated Sludge Data Using Kohonen Self-Organizing Map. *J Environ Eng*. 2007; 133: 909–916. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2007\)133:9\(909\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:9(909)).
37. Perez-D'Arpino C, Shah JA. Fast target prediction of human reaching motion for cooperative human-robot manipulation tasks using time series classification. 2015 IEEE Int Conf Robot Autom. Seattle, WA, USA: IEEE; 2015. pp. 6175–6182. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7140066>
38. Qu X. Age-related cognitive task effects on gait characteristics: do different working memory components make a difference? *J Neuroeng Rehabil*. 2014; 11: 149–157. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-149> PMID: [25348927](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25348927/)
39. Wrightson JG, Ross EZ, Smeeton NJ. The effect of cognitive-task type and walking speed on dual-task gait in healthy adults. *Motor Control*. 2016; 20: 109–121. <https://doi.org/10.1123/mc.2014-0060> PMID: [25823560](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25823560/)
40. Hocking DR, Fritsche S, Farhat H, Atkinson A, Bendak H, Menant J. Working memory is a core executive function supporting dual-task locomotor performance across childhood and adolescence. *J Exp Child Psychol*. 2020; 197: 104–121. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104869> PMID: [32574754](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32574754/)

41. Purcell NL, Goldman JG, Ouyang B, Liu Y, Bernard B, O'Keefe JA. The effects of dual-task cognitive interference on gait and turning in Huntington's disease. Gonzalez-Alegre P, editor. *PLoS One*. 2020;15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226827> PMID: [31910203](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31910203/)
42. Gruber O. Effects of domain-specific interference on brain activation associated with verbal working memory task performance. *Cerebral Cortex*. 2011; 11: 1047–1055. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.11.1047> PMID: [11590114](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11590114/)
43. Serrien DJ. Verbal–manual interactions during dual task performance: An EEG study. *Neuropsychologia*. 2009; 47: 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.08.004> PMID: [18768145](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18768145/)
44. Krajenbrink H, van Abswoude F, Vermeulen S, van Cappellen S, Steenbergen B. Motor learning and movement automatization in typically developing children: The role of instructions with an external or internal focus of attention. *Hum Mov Sci*. 2018; 60: 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.06.010> PMID: [29945034](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29945034/)
45. Muller H, Loosch HME. Functionnal variability and an equifinal path of movement during targeted throwing. *J Hum Mov Stud*. 1999; 36: 103–126. <https://doi.org/10.1.1.453.844>
46. Patel P, Lamar M, Bhatt T. Effect of type of cognitive task and walking speed on cognitive-motor interference during dual-task walking. *Neuroscience*. 2014; 260: 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.016> PMID: [24345478](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24345478/)
47. Shah J, Wiken J, Williams B, Breazeal C. Improved human-robot team performance using chaski, a human-inspired plan execution system. Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction—HRI '11. Lausanne, Switzerland: ACM Press; 2011. pp. 29–36. <https://doi.org/10.1145/1957656.1957668>
48. Vasalya A, Ganesh G, Kheddar A. More than just co-workers: Presence of humanoid robot co-worker influences human performance. Sakakibara Meditor. *PLoS One*. 2018;13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206698> PMID: [30408062](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30408062/)
49. Bisio A, Sciutti A, Nori F, Metta G, Fadiga L, Sandini G, et al. Motor contagion during Human-Human and Human-robot interaction. Avenanti A, editor. *PLoS One*. 2014;9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106172> PMID: [25153990](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25153990/)
50. Bisio A, Stucchi N, Jacono M, Fadiga L, Pozzo T. Automatic versus voluntary motor imitation: Effect of visual context and stimulus velocity. Gribble PL, editor. *PLoS One*. 2010;5. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013506> PMID: [20976006](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20976006/)
51. Noy L, Rumiati RI, Flash T. Simple movement imitation: Are kinematic features sufficient to map perceptions into actions? *Brain Cogn*. 2009; 69: 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.08.030> PMID: [18834653](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18834653/)
52. Vasalya A, Ganesh G, Kheddar A. Distinct motor contagions during and after observation of actions by a humanoid co-worker. 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN). Nanjing: IEEE; 2018. pp. 51–57. <https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525641>
53. Winkel J, Westgaard RH. Risk factors of occupational MSDs and potential solutions: past, present and future. *Risk*. 2008; 34: 3–7.
54. Lamon E, De Franco A, Peternel L, Ajoudani A. A Capability-Aware Role Allocation Approach to Industrial Assembly Tasks. *IEEE Robot Autom Lett*. 2019; 4: 3378–3385. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2926963>
55. Bernar A, Prevot C, Legardeur J, Chanal H. Comment favoriser la transition vers l'industrie 4.0 dans le secteur textile-habillement: étude de cas du déploiement d'un cobot au sein de l'entreprise Petit Bateau. 18ème Colloque national S.mart. Carry le Rouet; 2023.
56. Maurice P, Allienne L, Malaise A, Ivaldi S. Ethical and Social Considerations for the Introduction of Human-Centered Technologies at Work. 2018 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). Genova, Italy: IEEE; 2018. pp. 131–138. <https://doi.org/10.1109/ARSO.2018.8625830>
57. Bao SS, Kapellusch JM, Merryweather AS, Thiese MS, Garg A, Hegmann KT, et al. Relationships between job organisational factors, biomechanical and psychosocial exposures. *Ergonomics*. 2016; 59: 179–194. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1065347> PMID: [26102483](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26102483/)