



HAL
open science

Influence de la cadence de production lors d'une situation collaborative humain-cobot sur les performances de travail et la santé de l'opérateur

Kévin Bouillet, Sophie Lemonnier, Fabien Clanché, Gérôme Gauchard

► To cite this version:

Kévin Bouillet, Sophie Lemonnier, Fabien Clanché, Gérôme Gauchard. Influence de la cadence de production lors d'une situation collaborative humain-cobot sur les performances de travail et la santé de l'opérateur. 2023. hal-04006951

HAL Id: hal-04006951

<https://hal.science/hal-04006951>

Preprint submitted on 27 Feb 2023

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.

Influence de la cadence de production lors d'une situation collaborative humain-cobot sur les performances de travail et la santé de l'opérateur

Influence of production pace during a collaborative work human-cobot on working performance and operator's health

KEVIN, BOUILLET, Université de Lorraine, Laboratoire DevAH, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

SOPHIE, LEMONNIER, Université de Lorraine, Laboratoire PErSEUs, 57045 Metz, France

FABIEN, CLANCHE, Université de Lorraine, Faculté des Sciences du Sport, 54600 Villers-lès-Nancy, France

GEROME, GAUCHARD, Université de Lorraine, Laboratoire DevAH, 54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

In a collaborative task between an operator and a collaborative robot (cobot), pace could influence work performance as well as human behaviors, with potential repercussions on his health. We analyze the impact of pace (three imposed-speeds) and leader (cobot/human), on productivity, their interactions, biomechanical solicitations, attentional resources and workload. Twenty participants manufactured products in collaboration with a cobot. Results suggested that the fastest imposed pace improved production and interactions to the detriment of an increase of biomechanical solicitations and perceived workload. Moreover, the fact that the human was leading the pace seemed slightly increase production, without any other difference. This study underlines the importance of matching work pace to operator's capacity, and indicate that a pace led by the operator could maintain his health capital without deteriorate production.

CCS CONCEPTS • Human-centered computing • Collaborative interaction

Additional Keywords and Phrases: Human-cobot interaction, Pace, Leader, MSDs, Cognitive load.

Dans une tâche collaborative entre un opérateur et un robot collaboratif (cobot), la cadence pourrait influencer les performances de travail ainsi que les comportements de l'humain, avec de potentielles répercussions sur sa santé. Nous analysons l'impact de la cadence (trois vitesses imposées) et du meneur (cobot/humain) de la cadence, sur la productivité, leurs interactions, les sollicitations biomécaniques, les ressources attentionnelles et la charge de travail. Vingt participants ont fabriqué des produits en collaboration avec un cobot. Les résultats suggéraient que la cadence imposée la plus rapide améliorait la production et les interactions au détriment d'une augmentation des sollicitations biomécaniques et de la charge de travail perçue. De plus, le fait que l'humain menait la cadence semblait légèrement améliorer la production, sans autre différence. Cette étude souligne l'importance d'adapter la cadence de travail aux capacités de l'opérateur, et indique qu'une cadence menée par l'opérateur pourrait préserver son capital santé sans dégrader la production.

Mots-clés additionnels : Interactions humain-cobot, Cadence, Meneur, TMS, Charge cognitive.

Reference:

IHM '23, April 3-6, Troyes, France

This is the author's draft version of the work. It is posted here for your personal use. Not for distribution. The definitive version of record was published in IHM '23: Proceedings of the 34th Conference on l'Interaction Humain-Machine.

ISBN 978-1-4503-9825-1

<https://doi.org/10.1145/3583961.3583963>

1 INTRODUCTION

Dans le contexte de l'Industrie 4.0, avec notamment des systèmes de production plus flexibles, les robots collaboratifs (cobots) sont de plus en plus nombreux dans les usines, leur nombre ayant doublé depuis 2017 [27]. Les cobots sont des robots conçus pour collaborer avec les humains, pour interagir, physiquement ou non, dans un espace de travail partagé [39]. Ainsi, dans un système humain-cobot, les interactions entre les humains et les cobots peuvent être diverses.

Quand la situation est dite collaborative, cela fait référence au plus haut niveau d'interactions entre l'humain et le cobot. Les interactions peuvent y être définies comme étant soit une coopération soit une collaboration [22]. Dans ces deux types d'interaction, ils travaillent dans le même espace de travail avec un but commun. Cependant, lors d'une coopération, l'humain et le cobot remplissent des exigences de temps et d'espace pour éviter tout contact possible. Au contraire, lors d'une collaboration, des interactions directes physiques sont possibles, avec des contacts possibles. Au plus haut niveau d'interaction, la synchronisation entre les deux est meilleure avec des interactions plus fluides [24]. Ces deux types d'interaction tirent parti des avantages de l'humain (i.e., dextérité, flexibilité et perception) et du cobot (i.e., répétabilité et précision) pour une production plus efficiente et flexible [43]. Cependant, ces nouvelles interactions peuvent créer des collisions par la proximité entre les deux, mais aussi faire apparaître ou déplacer des troubles musculosquelettiques (TMS) chez l'humain ou créer une surcharge mentale en raison de la proximité ou d'une cadence non adaptée [43].

Ces TMS, un problème majeur pour les employés et les entreprises, sont décrits comme une pathologie d'origine multifactorielle, impliquant l'organisation du travail, les facteurs psychosociaux, le stress ou les sollicitations biomécaniques [44]. D'après un modèle dynamique des troubles musculosquelettiques de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), les sollicitations biomécaniques constituent la partie centrale et fondamentale de l'apparition des TMS. En effet, les forces excessives [21] et les mauvaises postures, jugées difficiles par les opérateurs [5] sont des causes principales de l'apparition des TMS. Reconnue comme un facteur de risque majeur, la posture doit être étudiée avant l'apparition des symptômes liés aux TMS à des fins de prévention. Il existe différentes méthodes pour les évaluer, notamment REBA [23], OCRA [12] et RULA [34]. La dernière méthode se penche sur les risques d'apparition de TMS au niveau du tronc, de la nuque et des membres supérieurs, la rendant indispensable lors de l'évaluation d'une tâche répétitive des membres supérieurs.

Une étude récente s'est intéressée aux répercussions de l'introduction d'un cobot dans une situation collaborative [9]. Lors d'une tâche collaborative réalisée d'une part avec un co-travailleur humain et d'autre part avec un co-travailleur cobot, le nombre de produits fabriqués a été diminué d'environ un tiers avec le cobot par rapport aux performances entre les deux humains. Malgré la productivité moins importante, les auteurs ont remarqué que la posture des opérateurs était moins à risque de développer des TMS (scores RULA moins

importants) lorsqu'ils travaillaient avec le co-travailleur cobot plutôt qu'humain. Les résultats de cette étude [9] pose question de l'effet de la cadence de production sur ces résultats.

La cadence de production peut être un facteur d'apparition de TMS. En effet, la cadence est associée à la fréquence des mouvements de l'opérateur, qui est un des facteurs des niveaux d'expositions biomécaniques [33,42]. La planification motrice et les processus exécutifs sont affectés par une augmentation de la cadence, notamment par des ajustements des mouvements plus difficiles car la fenêtre temporelle n'est plus suffisante [15]. La cadence de production ne se définit pas uniquement par le nombre de produits fabriqués en un laps de temps. Elle peut également se définir selon son meneur de celle-ci : l'opérateur ou la machine. Lors d'une étude menée sur 1834 personnes visant à explorer les relations entre des variables organisationnelles, biomécaniques et psychosociales du travail avec les TMS, il a été montré qu'environ la moitié d'entre eux travaillait à une cadence menée par la machine, tandis que l'autre moitié la menait eux-mêmes [1]. Dans cette étude, les auteurs ont comparé différents facteurs humains, dont les sollicitations biomécaniques évaluées notamment par la force, des échelles de Borg et la posture des articulations du poignet, dans des situations où le leader de la cadence variait : soit la machine soit l'opérateur. Les auteurs ont indiqué que les sollicitations biomécaniques étaient plus importantes lorsque la machine menait la cadence [1]. Cependant ce résultat semble différer dans l'étude de Dempsey et ses collaborateurs (2010). Dans cette étude [14], des opérateurs ont effectué une tâche d'assemblage et de désassemblage avec une machine. Dans une condition l'opérateur menait la cadence et dans une autre la cadence était menée par la machine à une vitesse imposée. Les auteurs ont observé que les sollicitations biomécaniques étaient plus importantes lorsque l'opérateur menait cette cadence [14].

L'attribution du rôle de meneur de la cadence, ainsi que la vitesse de celle-ci, n'ont pas des effets uniquement sur la gestuelle et la posture des opérateurs. Modifier un de ces deux paramètres pourrait avoir également une influence sur la performance de travail (i.e., productivité, qualité), sur les paramètres temporels du travail de l'opérateur, mais aussi au niveau de sa charge de travail (i.e., le coût de l'accomplissement des exigences de la mission pour l'opérateur humain [19,20]). En effet, entre une cadence libre menée par un opérateur et une cadence qui lui est imposée selon des normes ergonomiques où l'opérateur suit cette cadence, il a été observé un taux de production amélioré ainsi qu'une activité plus importante et plus rapide de l'opérateur avec la cadence libre [14], qui pourrait être à l'origine de l'augmentation des sollicitations biomécaniques de l'opérateur. En revanche, sur un plan psychosocial, mener la cadence semble être plus bénéfique que la subir [1].

La cadence de travail a une influence sur la posture et les risques d'apparition de TMS, mais pourrait aussi influencer aux niveaux des comportements cognitifs. En effet, une forte charge de travail, une forte demande psychologique et une faible latitude de décisions sont liées à un risque accru d'apparition des TMS [7,28,30]. Le NASA-TLX (NASA Task Load Index), outil d'évaluation multidimensionnel et subjectif de la charge de travail [19,20] est composé de six sous-échelles correspondant chacune à une dimension de la charge de travail. Des études ont montré un lien entre les TMS et la charge de travail perçue, mesurée par le score du NASA-TLX [18,29] mais aussi pour ses différentes dimensions [6,13].

Récemment, les travaux de Bouillet et ses collaborateurs [9] ont montré une amélioration de la posture avec l'introduction d'un cobot dans une situation de travail collaborative, pouvant être liée à la diminution de la cadence de production. Dans ce contexte, l'objectif de notre étude visait à étudier les répercussions de deux composantes de la cadence, la vitesse et le meneur, sur la performance de production ; les interactions entre

l'opérateur humain et un cobot ; la posture de l'opérateur ; les ressources attentionnelles ; sa charge de travail perçue.

Nous émettons deux hypothèses pour ce travail :

- H1 : l'augmentation de la cadence imposée augmente la productivité, les interactions et les risques d'apparition de TMS (avec une augmentation des contraintes biomécaniques, de la charge attentionnelle et de la charge de travail perçue) ;
- H2 : être meneur de la cadence, par rapport à être suiveur (i.e., cobot meneur), augmente la productivité et les interactions mais diminue les risques d'apparition de TMS (avec une réduction des contraintes biomécaniques, de la charge attentionnelle et de la charge de travail perçue).

2 METHODOLOGIE

2.1 Participants

Vingt étudiants de l'Université de Lorraine ($21,1 \pm 2,0$ ans) ont participé à cette étude. Ils ne présentaient aucune déficience affectant le contrôle moteur ni le comportement attentionnel. Aucun n'était familier du travail à la chaîne ou du contact avec un cobot. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement écrit.

2.2 Tâches expérimentales & matériel

2.2.1 La tâche expérimentale

Les participants ont réalisé deux tâches simultanément : une tâche motrice de fabrication de produits avec un cobot et une tâche auditive de comptage d'une lettre prédéterminée dans un enregistrement audio. Cette tâche et le poste de travail sont identiques à ceux d'une étude précédente [9].

Le cobot utilisé était un YuMi du groupe ABB, composé de deux bras, chacun avec sept points d'articulation (Figure 1A). Au bout de chacun des deux bras se trouvait une pince ; et une ventouse était située au niveau de son poignet gauche. Le produit à fabriquer était composé de différents composants : un carénage, un cœur de produit en aluminium, un couvercle, trois vis et trois écrous. Le cobot et le participant avaient différentes sous-tâches attribuées dans un ordre précis pour fabriquer le produit, les différentes étapes de production sont représentées dans l'Annexe 1. Le participant doit réaliser quatre étapes pour chaque produit : insérer le produit SFP (Système Flexible de Production) dans le carénage sur le socle central et à trois reprises insérer l'écrou dans le carénage et visser au niveau du socle central. Le cobot a pour étapes d'apporter le carénage sur le socle central, déposer le couvercle sur le carénage avec le produit SFP dedans, tourner le produit de 120° à deux reprises entre les étapes de vissage du participant et évacuer le produit. Ils travaillaient face à face, avec un plan de travail collaboratif placé entre eux (Figure 1B). Celui-ci se décompose en trois zones : la « zone cobot » où seul le cobot peut agir ; la « zone humain » où seul le participant peut agir ; la « zone collaborative » où le participant et le cobot peuvent agir ou interagir de manière synchrone ou asynchrone.

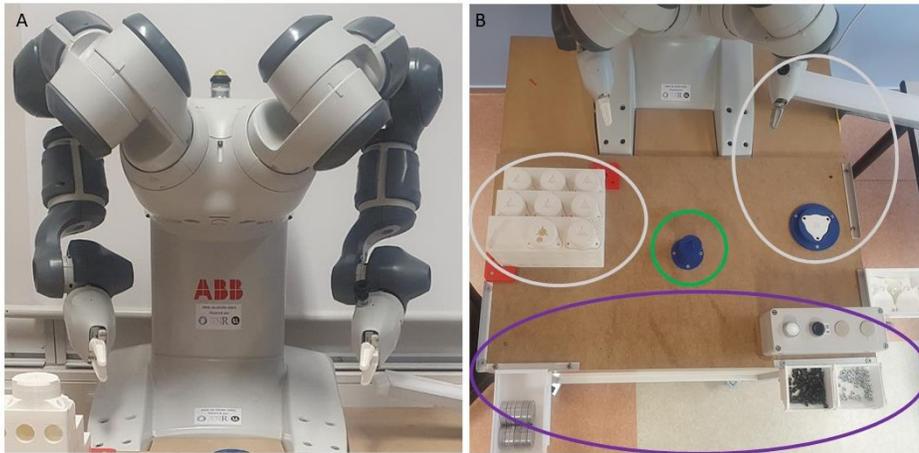


Figure 1 : A/ Cobot YuMi du groupe ABB avec sept points d'articulations à chaque bras ; B/ plan de travail collaboratif avec les trois zones : « zone cobot » dans les ellipses grises, « zone humain » dans l'ellipse violette et « zone collaborative » dans le cercle vert.

2.2.2 La cadence

Deux modalités étaient définies selon le fait que les participants soient meneur ou non de la cadence de production :

- La modalité « Déclenchement Manuel » (DM), avec le participant qui menait la cadence de production. A la fin de chaque sous-tâche, le participant appuyait sur le bouton d'une télécommande placée sur le plan de travail pour donner la commande au cobot d'effectuer sa prochaine sous-tâche. Cette action n'est pas comptabilisée comme une étape pour le participant. Dans cette modalité, le participant avait un rôle de meneur, tandis que le cobot avait un rôle de suiveur [4] ;
- La modalité « Automatique » (AUTO), avec le cobot qui menait la cadence de production selon trois conditions qui dépendaient du nombre de produits à fabriquer durant un essai (d'une durée de trois minutes) : AUTO-SLOW (3 produits et 1 étape pour le participant), AUTO-MEAN (4 produits) et AUTO-FAST (5 produits). Le nombre de produits à fabriquer dans les trois modalités a été déterminé en se basant sur une étude précédente [9]. Le contexte expérimental et la tâche étaient identiques, mais seule la condition DM y était présente. Pour calibrer la condition AUTO-MEAN, la performance moyenne (i.e., le nombre de produits fabriqués en moyenne) a été reprise de l'expérimentation précédente [9]. Au total, le participant doit réaliser 13 étapes pour AUTO-SLOW, 16 étapes pour AUTO-MEAN et 20 étapes pour AUTO-FAST. Le cobot effectuait donc ses différentes sous-tâches avec une cadence imposée. Il avait le rôle de meneur tandis que le participant avait celui de suiveur.

2.2.3 Actions et interactions du cobot et des participants

Chaque passation était filmée par une caméra QFHD Pro Series à 15Hz (Dahua, Hangzhou, Chine) posée sur un mur. Les enregistrements vidéo ont été exportés sur le logiciel Smart PSS 1.13.1, puis ceux-ci ont été codés

sur le logiciel Captiv-L7000 2.3.18. Le codage des vidéos permettait de quantifier les actions du participant et du cobot à partir du codage d'Hoffman (2019) [24]. Pour les deux, les actions ont été codées selon la dichotomie « Inactivité » (i.e., aucune action motrice effectuée sur le produit) et « Activité » (i.e., action motrice effectuée sur le produit). L'activité du participant était à nouveau décomposée selon la localisation de son activité motrice : « Activité directe », lorsque l'action était dans la zone collaborative ; « Activité indirecte », lorsque l'action était en dehors de la zone collaborative.

A partir de là, nous avons pu coder les interactions avec la taxonomie décrite par Hentout et ses collaborateurs [22] : « Temps mort » lorsque les deux étaient inactifs ; « Coopération » lorsque l'un des deux était actif tandis que l'autre était inactif ; « Collaboration » lorsque les deux étaient actifs. De plus, si l'action du participant était une « Activité directe », l'interaction était une « Collaboration directe ».

2.2.4 Motion capture : la posture des participants

Les participants étaient équipés de dix-sept capteurs de mouvement, de type centrales inertielles sans fil MVN BIOMECH Awinda à 60Hz (Xsens, Enschede, Pays-Bas) répartis sur la tête, le tronc et les membres supérieurs et inférieurs [38]. Les coordonnées de position de certains points du corps ainsi que leur orientation en quaternion étaient enregistrées. Puis, avec un modèle biomécanique du logiciel Xsens MVN Animate Pro 2021.0.0 et un programme MATLAB, les données d'angle des articulations de la nuque, du tronc et des membres supérieurs ont été calculées pour l'ensemble d'un essai. A partir de ces données d'angle, une évaluation RULA [34] a été effectuée avec un autre programme MATLAB.

2.2.5 Ressources attentionnelles : tâche auditive

Les participants performaient une seconde tâche en parallèle de celle de fabrication des produits en collaboration avec le cobot, afin de comparer les ressources attentionnelles dans les différentes conditions. Pour cette tâche, la modalité auditive a été choisie pour éviter des interférences avec la tâche principale visuo-motrice [2]. Cette tâche auditive est inspirée de celle de Richer et Lajoie (2019) [36]. Cette tâche consistait en un enregistrement audio diffusé aux participants, pendant qu'ils effectuaient la tâche motrice, avec un casque audio sans fil SoundLink II (Bose, Framingham, MA, USA). Cet enregistrement présentait une suite de lettres phonétiquement proches (B, D, P et T) avec un intervalle inter-stimulus de deux secondes. Les différents enregistrements ont été réalisés par une orthophoniste, et l'ordre aléatoire de présentation des lettres a été créé via le logiciel Matlab. A la fin de chaque essai, les participants donnaient le nombre d'occurrences d'une de ces lettres, annoncée avant l'essai.

2.2.6 Charge de travail : NASA-TLX

Les participants remplissaient un NASA-TLX (version française [10]) pour chacune des quatre conditions expérimentales, afin d'évaluer la charge de travail perçue. Cet outil se compose de six dimensions : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, effort, performance et frustration. Les participants évaluaient la tâche de 0 à 100 sur une échelle de Lickert pour chacune de ces six dimensions. Puis, ils effectuaient une

comparaison par paire des six dimensions (i.e., quinze comparaisons) en indiquant à chaque fois laquelle avait le plus contribué à la charge de travail.

2.3 Procédure

A l'arrivée des participants, le matériel et les différentes tâches leur étaient expliqués, puis ils signaient un formulaire de consentement et lisaient un document d'information relatif à l'expérimentation.

Ensuite, les participants étaient équipés des centrales inertielles de la motion capture et réalisaient la phase de calibration comme recommandé [38]. Les participants étaient par la suite placés face au cobot, devant le plan de travail. Ils bénéficiaient de quatre phases d'apprentissage pour les deux tâches : d'abord la tâche motrice en simple tâche, dans la condition DM ; puis la tâche auditive en simple tâche ; ensuite les deux tâches en condition DM ; enfin les deux tâches en condition AUTO-MEAN. Les participants étaient ensuite informés de comment et à quel moment remplir le NASA-TLX.

Une condition était composée de trois essais de trois minutes. Les participants passaient l'ensemble des quatre conditions (i.e., DM, AUTO-SLOW, AUTO-MEAN et AUTO-FAST). Ils remplissaient le NASA-TLX pour chaque condition, après le troisième essai de celle-ci. Pour éviter des effets d'apprentissage et de fatigue, deux contrebalancements étaient effectués. Le premier concernait le meneur de la cadence : soit le participant débutait par la condition DM puis effectuait les trois conditions de la modalité AUTO, soit l'inverse. Le second contrebalancement concernait la cadence imposée par le cobot : dans le bloc des trois conditions de la modalité AUTO, soit le participant effectuait les conditions dans un ordre crescendo (i.e., AUTO-SLOW, AUTO-MEAN puis AUTO-FAST) soit dans un ordre decrescendo (i.e., AUTO-FAST, AUTO-MEAN puis AUTO-SLOW). Ainsi, il existait quatre schémas de passations possibles, avec cinq participants par schéma.

Pour chaque condition, les participants effectuaient trois essais de trois minutes, coupés par des pauses de deux ou trois minutes, le temps de démonter les produits fabriqués et de remettre en place le plan de travail. Les pauses entre les conditions étaient de cinq à sept minutes, pour les mêmes raisons que celles citées précédemment, mais aussi le temps pour les participants de remplir les NASA-TLX. Une passation complète durait environ deux heures trente par participant.

2.4 Analyse des données

Pour chaque variable, une valeur moyenne a été calculée par condition à partir des trois essais. Les *outliers* (i.e., données inférieures ou supérieures de trois écarts-types à la moyenne) ont été remplacés par les valeurs moyennes [37]. Les variables mesurées sont décrites dans le Tableau 1 avec les outils de mesure utilisés.

Tableau 1 : Liste des variables mesurées, avec leur description et les outils de mesure

Nom de la VD	Descriptif	Outil de mesure
Tâche motrice		
Nombre de produits	Combien de produits ont été correctement et entièrement fabriqués par le participant et le cobot.	Relevé manuel sur le logiciel
Nombre d'étapes	Combien d'étapes ont été correctement réalisées par le participant.	Microsoft Excel.
Interactions entre le participant et le cobot		
Temps morts	Pourcentage de temps où le participant et le cobot sont en « Inactivité ».	Enregistrements vidéo & codage avec le logiciel Captiv.
Coopération	Pourcentage de temps où le participant ou le cobot est en « Activité » et l'autre en « Inactivité ».	
Collaboration	Pourcentage de temps où le participant et le cobot sont en « Activité ».	
Collaboration directe	Pourcentage de temps où le participant est en « Activité directe » et le cobot en « Activité ».	
Posture		
Position moyenne de l'articulation	Moyenne de l'angulation pour les flexions du dos et de la nuque, l'abduction et la flexion des épaules et pour les flexions des coudes et des poignets.	Centrales inertielles Xsens & programmes Matlab.
Score RULA moyen	Score moyen à l'évaluation RULA lors des trois minutes d'un essai, pour le côté gauche et côté droit. Valeur ordinale entre 1 et 7.	
Score RULA pour chaque articulation	Score moyen à l'évaluation RULA pour les articulations du dos, de la nuque, des épaules, des coudes et des poignets.	
Tâche auditive		
Taux de réussite	Pourcentage d'essais avec la bonne réponse par rapport au nombre d'essais.	Relevé manuel sur le logiciel
Erreur absolue	Ecart absolu entre la réponse indiquée par le participant et la bonne réponse à la tâche.	Microsoft Excel.
Charge de travail		
Score global du NASA-TLX	Score obtenu au NASA-TLX. Valeur comprise entre 0 et 100.	NASA-TLX
Scores des dimensions du NASA-TLX	Score pondéré pour les six dimensions du NASA-TLX. Valeur comprise entre 0 et 33,3.	

Le taux de réussite à la tâche auditive a été comparé avec des tests du χ^2 pour évaluer s'il existe une indépendance entre les quatre conditions. Pour toutes les autres variables, une ANOVA à mesures répétées non paramétrique de Friedman était effectuée pour comparer les conditions de la modalité AUTO. Si le test précédent était significatif, alors il était complété d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Puis, trois tests de Wilcoxon pour échantillons appariés étaient effectués pour comparer la condition DM avec les trois conditions de la modalité AUTO. Pour tester un effet d'apprentissage à la tâche motrice, le nombre de produits

fabriqués et le nombre d'étapes réussies à la condition DM pour les dix participants débutant par cette condition étaient comparés avec ceux des dix participants finissant par cette condition. Cette comparaison était effectuée par un test U de Mann-Whitney. Les différents tests statistiques étaient effectués sur le logiciel STATISTICA v.10. Le niveau de significativité α est fixé à 0,05.

3 RÉSULTATS

3.1 Performance aux tâches

Le nombre de produits correctement fabriqués (Figure 2A) était plus important dans les deux conditions à cadences les plus rapides AUTO-MEAN et AUTO-FAST que dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). Le nombre d'étapes réussies (Figure 2B) était maximal dans la condition AUTO-FAST et minimal dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). En revanche, les pourcentages de produits fabriqués (AUTO-SLOW = 100,0 (2,8) ; AUTO-MEAN = 91,7 (16,7) ; AUTO-FAST = 80,0 (23,3)) et d'étapes réussies (AUTO-SLOW = 100,0 (0,6) ; AUTO-MEAN = 97,9 (6,3) ; AUTO-FAST = 94,2 (9,2)), par rapport aux attentes de la cadence, étaient maximaux avec la cadence la moins rapide et minimaux avec la cadence la plus rapide.

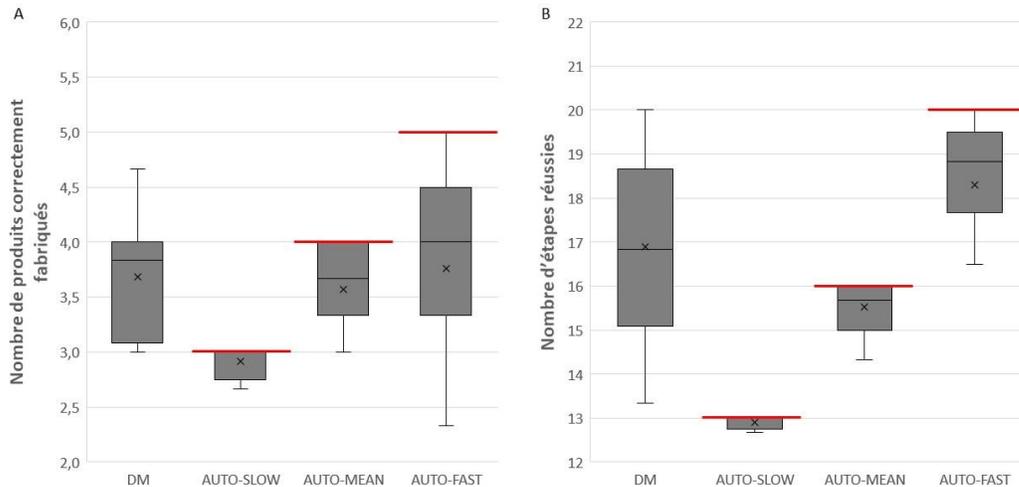


Figure 2 : Performances à la tâche motrice selon les conditions. A/ Nombre de produits correctement fabriqués. B/ Nombre d'étapes réussies.

Lorsque le participant menait la cadence de production (i.e., condition DM), le nombre de produits correctement fabriqués (Figure 2A) était similaire à ceux des conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST, mais supérieur à ceux en condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). Le nombre d'étapes réussies (Figure 2B) à la condition DM était supérieur aux conditions AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et AUTO-MEAN ($p < 0,001$) mais inférieur à la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Le nombre de produits correctement fabriqués, ainsi que le nombre d'étapes réussies, étaient plus importants pour les dix participants ayant terminé par la condition DM que ceux ayant débuté par cette condition ($p < 0,01$ pour les deux variables).

Ainsi, augmenter la cadence imposée a augmenté le nombre d'étapes réussies tandis que l'augmentation du nombre produits fabriqués s'observait jusqu'à un seuil qui correspondait à la vitesse moyenne. Cependant, l'augmentation de la cadence imposée dégradait les pourcentages de produits fabriqués et d'étapes réussies. Les différences entre mener ou suivre la cadence dépendaient de la cadence imposée, mais mener ou suivre la cadence à une vitesse moyenne n'influçait pas le nombre de produits fabriqués.

3.2 Interactions entre le cobot et le participant

Les différentes interactions, entre le cobot et le participant, sont représentées dans la Figure 3. Lorsque la cadence était imposée, le taux de temps morts était le plus important avec la cadence la plus lente et était le moins important avec la cadence la plus rapide ($p < 0,001$), et inversement pour les taux de collaboration ($p < 0,001$) et de collaboration directe ($p < 0,001$). Le taux de coopération ne différait pas selon la cadence imposée ($p = 0,058$).

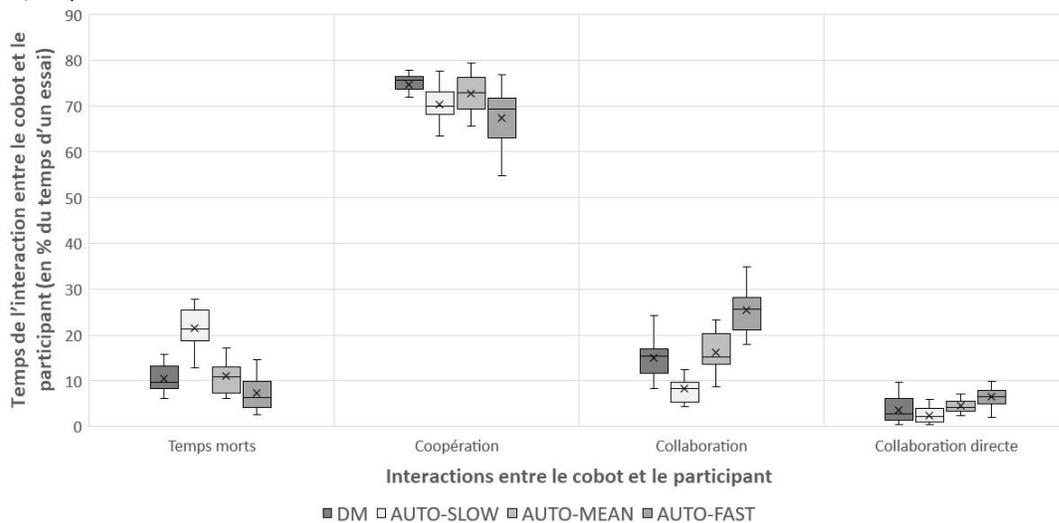


Figure 3 : Taux d'interactions entre le participant et le cobot pour les quatre conditions. Temps morts = participant et cobot en « Inactivité ». Coopération = participant ou cobot en « Activité » et l'autre en « Inactivité ». Collaboration = participant et cobot en « Activité ». Collaboration directe = participant en « Activité directe » et cobot en « Activité ».

Lorsque le participant menait la cadence de production (en gris le plus foncé dans la Figure 3), le taux de temps morts était similaire à celui de la condition AUTO-MEAN, inférieur à la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$) et supérieur à la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$), et inversement pour le taux de collaboration ($p < 0,001$ avec AUTO-SLOW et AUTO-FAST). Le taux de coopération quand le participant menait la cadence était supérieur aux conditions AUTO-SLOW ($p < 0,01$) et AUTO-FAST ($p < 0,001$) mais aucune différence n'est observée avec AUTO-MEAN ($p = 0,062$). Le taux de collaboration directe quand le participant menait la cadence ne différait pas de ceux des conditions AUTO-SLOW ($p = 0,062$) et AUTO-MEAN ($p = 0,062$) mais était inférieur à celui de la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$).

Ainsi, augmenter la cadence imposée augmente les taux de collaboration et de collaboration directe et diminue le taux de temps morts. Mener ou suivre la cadence imposée moyenne ne font pas différer ces trois taux.

3.3 Posture du participant

3.3.1 Evaluations RULA

Une évaluation RULA a été effectuée, permettant d'obtenir un score RULA moyen pour chaque essai pour les deux côtés, étant un score compris entre 1 et 7. Plus ce score est élevé, plus le risque d'apparition de TMS est présent. Les scores RULA moyens sont présentés dans le Tableau 2. Pour les deux côtés, les scores RULA moyens étaient plus importants dans la condition AUTO-FAST que la condition AUTO-MEAN ($p < 0,05$ pour les deux comparaisons) sans autre différence observée. Lorsque le participant mène la cadence, le score RULA moyen ne différait avec aucune condition de la modalité AUTO.

Tableau 2 : Scores RULA moyens pour les côtés gauche et droit

	DM	AUTO-SLOW	AUTO-MEAN	AUTO-FAST
Gauche	3,90 (1,11)	3,84 (0,80)	3,90 (0,71)	4,07 (0,58)
Droit	3,87 (1,07)	3,64 (0,72)	3,77 (0,90)	3,85 (0,72)

Ainsi, la posture du participant semblait plus à risque avec une forte cadence imposée, tandis que mener la cadence ou la suivre, à même production (AUTO-MEAN), semblait ne pas influencer la posture générale.

3.3.2 Tronc et nuque

La flexion moyenne du dos était maximale dans la condition AUTO-FAST et minimale dans la condition AUTO-SLOW pour les trois conditions de la modalité AUTO ($p < 0,01$). La flexion moyenne de la nuque était moins importante dans la condition AUTO-SLOW que dans les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,01$). Lorsque le participant menait la cadence (condition DM), la flexion moyenne du dos était seulement moins importante que celle en condition AUTO-FAST ($p < 0,05$), tandis que la flexion moyenne de la nuque semblait seulement plus importante que celle en condition AUTO-SLOW (tendance à la significativité $p = 0,093$). Les valeurs de flexions du dos et du tronc sont représentées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Position angulaire moyenne des articulations étudiées (en °).

	Dos	Nuque	Epaules				Coudes		Poignets	
	Flexion	Flexion	Abduction		Flexion		Flexion		Flexion	
			G	D	G	D	G	D	G	D
DM	5,3 (11,5)	6,2 (5,2)	14,6 (4,8)	18,9 (5,9)	18,0 (14,9)	12,8 (9,4)	65,3 (17,9)	72,2 (16,2)	-23,1 (7,6)	-24,9 (6,6)
AUTO-SLOW	5,4 (11,5)	5,6 (3,6)	12,9 (5,6)	17,0 (3,3)	16,5 (10,4)	15,5 (7,3)	64,5 (20,4)	70,3 (28,3)	-25,1 (11,0)	-23,8 (7,1)
AUTO-MEAN	9,5 (16,2)	7,0 (4,2)	16,1 (5,1)	19,1 (4,0)	16,6 (8,3)	11,9 (9,9)	67,2 (25,6)	74,1 (20,0)	-23,5 (10,8)	-22,4 (7,1)
AUTO-FAST	10,7 (11,2)	7,4 (3,4)	15,9 (11,0)	19,4 (7,5)	19,1 (9,1)	12,3 (8,8)	72,0 (23,4)	71,0 (18,8)	-22,1 (11,1)	-23,5 (7,3)

Les évaluations RULA ont donné un score moyen pour chaque articulation, plus ce score est important, plus la position articulaire est à risque. Les scores RULA de la nuque (Annexe 2) ne différaient pas entre les quatre conditions. Pour le dos, les scores RULA (Annexe 2) étaient maximaux dans la condition AUTO-FAST et minimaux dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). Les scores à la condition DM étaient similaires à ceux de la condition AUTO-MEAN, inférieur à ceux de la condition AUTO-FAST ($p < 0,01$) mais ne différaient pas de ceux de la condition AUTO-SLOW ($p = 0,079$).

Par conséquent, la posture de la nuque et du dos semblait se dégrader avec une augmentation de la cadence imposée tandis que l'influence du meneur de la cadence dépendait de la vitesse de la cadence imposée.

3.3.3 Membres supérieurs

Les membres supérieurs sont décomposés en trois articulations : l'épaule, le coude et le poignet. L'articulation de l'épaule a été étudiée sur deux plans de l'espace, aux niveaux de l'abduction et de la flexion de celle-ci. Les articulations du coude et du poignet sont étudiées uniquement au niveau de leur flexion. Ces quatre mouvements ont été étudiés selon la position moyenne de ce mouvement par l'angulation moyenne. Ces valeurs sont décrites dans le Tableau 2. Pour les trois articulations, un score RULA a également été obtenu à partir des positions articulaires (Annexe 2).

Epaules

L'abduction de l'épaule droite était en moyenne minimale dans la condition AUTO-SLOW et maximale dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,01$). L'abduction moyenne de l'épaule gauche était minimale dans la condition AUTO-SLOW sans différence entre les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST ($p < 0,01$). Lorsque le participant menait la cadence, l'abduction moyenne de l'épaule droite était uniquement supérieure à celle de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,05$). Cependant, aucune différence n'a été constatée pour l'abduction moyenne de l'épaule gauche. La flexion moyenne de l'épaule droite était similaire pour les trois conditions de la modalité AUTO. La flexion moyenne de l'épaule gauche était maximale dans la condition AUTO-FAST et sans différence entre AUTO-SLOW et AUTO-MEAN ($p < 0,01$). Lorsque le participant menait la cadence, la flexion moyenne était similaire à celle des trois conditions de la modalité AUTO.

Concernant l'évaluation RULA pour les deux épaules, les scores de l'épaule droite ne différaient pas selon la condition de la modalité AUTO, tandis que pour l'épaule gauche les scores étaient maximaux pour la condition AUTO-FAST et minimaux pour la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$). Lorsque le participant menait la cadence, les scores des deux épaules étaient inférieurs à ceux de la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$ pour les deux épaules), et étaient uniquement supérieurs à ceux de la condition AUTO-SLOW pour l'épaule gauche ($p < 0,05$).

Les deux épaules semblaient être plus sollicitées biomécaniquement lorsque la cadence imposée augmentait, tandis que l'influence du meneur de la cadence sur ces sollicitations dépendait de la vitesse de la cadence imposée.

Coude

La flexion moyenne du coude droit était plus importante dans les conditions AUTO-MEAN et AUTO-FAST que dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$). Concernant le coude gauche, la flexion moyenne est minimale dans

la condition AUTO-SLOW et maximale dans la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$). Lorsque le participant menait la cadence, la flexion moyenne du coude droit ne différait d'aucune condition de la modalité AUTO. Pour le coude gauche, la flexion moyenne était uniquement inférieure à la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$).

Lorsque la cadence était imposée, les scores RULA des deux coudes ne différaient pas selon les conditions de la modalité AUTO. Lorsque le participant menait la cadence de production, les scores pour le coude droit ne différaient pas de ceux des conditions de la modalité AUTO, tandis que les scores étaient plus importants que ceux de la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$).

Ainsi, une cadence imposée plus rapide semblait légèrement augmenter les sollicitations biomécaniques au niveau des coudes. Mener la cadence ou la subir semblait légèrement influencer sur la sollicitation des coudes.

Poignet

La flexion moyenne des poignets droit et gauche ne différait pas selon les conditions de la modalité AUTO. Par contre, lorsque le participant menait la cadence, la flexion moyenne du poignet droit était plus importante que dans les conditions AUTO-MEAN ($p < 0,05$) et AUTO-FAST ($p < 0,05$). Aucune différence n'est observée pour le poignet gauche lorsque le participant menait la cadence.

Les scores RULA des deux poignets ne différaient pas selon les conditions de la modalité AUTO. De plus, les scores du poignet droit à la condition DM étaient similaires à ceux des conditions de la modalité AUTO.

La vitesse de la cadence imposée n'a pas influencé les sollicitations biomécaniques des poignets. En revanche, mener la cadence de production semblait légèrement augmenter ces sollicitations que lorsque la cadence était imposée.

Membres supérieurs

Pour résumer, lorsque la cadence imposée augmentait, les sollicitations biomécaniques semblaient plus importantes aux niveaux des épaules et des coudes, mais pas des poignets. En revanche, le fait de mener la cadence pour les participants semblait augmenter les sollicitations au niveau des articulations des membres supérieurs par rapport à une cadence imposée faible, et inversement lorsque la cadence imposée était importante.

3.4 Ressources attentionnelles : la tâche auditive

Le taux de réussite ne différait pas entre les trois conditions de la modalité AUTO (AUTO-SLOW = 20,3% ; AUTO-MEAN = 13,8% ; AUTO-FAST = 12,3%). En revanche, l'erreur absolue était plus importante dans les conditions AUTO-MEAN (3,7 (3,0)) et AUTO-FAST (3,7 (4,1)) que dans la condition AUTO-SLOW (2,7 (3,1)) ; $p < 0,01$). Lorsque le participant menait la cadence de production, le taux de réussite (15,0%) était similaire à lorsqu'il suivait une cadence imposée ; en revanche l'erreur absolue (2,3 (2,0)) était uniquement inférieure à celle en condition AUTO-FAST ($p < 0,05$).

Par conséquent, augmenter la cadence imposée n'influencait pas le taux de réussite mais celui-ci diminuait l'erreur absolue. Mener ou suivre la cadence imposée moyenne n'influencait pas ces deux variables.

3.5 Charge de travail : NASA-TLX

Le score global du NASA-TLX correspond à une valeur comprise entre 0 et 100, où plus le score est élevé, plus la charge de travail est importante. Les scores globaux au NASA-TLX étaient maximaux pour la condition AUTO-FAST et minimaux pour la condition AUTO-SLOW (AUTO-SLOW = 37,0 (24,4) ; AUTO-MEAN = 53,8 (14,7) ; AUTO-FAST = 64,3 (19,1) ; $p < 0,001$). Concernant la condition DM, le score global (52,0 (18,3)) n'était pas différent de celui à la condition AUTO-MEAN ($p = 0,370$), mais était supérieur à celui de la condition AUTO-SLOW ($p < 0,01$) et inférieur à celui de la condition AUTO-FAST ($p < 0,05$).

Concernant les six dimensions, les scores pondérés sont représentés dans la Figure 4. Les scores de l'exigence physique, de la performance et de la frustration ne différaient pas selon la condition à la modalité AUTO. En revanche, les scores de l'exigence mentale étaient plus importants dans la condition AUTO-FAST par rapport aux conditions AUTO-SLOW et AUTO-MEAN sans différence entre les deux dernières conditions ($p < 0,05$). Les scores de l'exigence temporelle et de l'effort étaient maximaux dans la condition AUTO-FAST et minimaux dans la condition AUTO-SLOW ($p < 0,001$ pour les deux dimensions). Lorsque les participants menaient la cadence de production, condition DM, les scores de l'exigence physique, de la performance et de la frustration ne différaient pas de ceux des trois conditions de la modalité AUTO. Pour les trois autres dimensions, les scores à la condition DM de l'exigence mentale et de l'effort étaient supérieurs à ceux à la condition AUTO-SLOW ($p < 0,05$ pour l'exigence mentale et $p < 0,01$ pour l'effort), tandis que, pour l'exigence temporelle, les scores à la condition DM étaient inférieurs à ceux à la condition AUTO-FAST ($p < 0,001$).

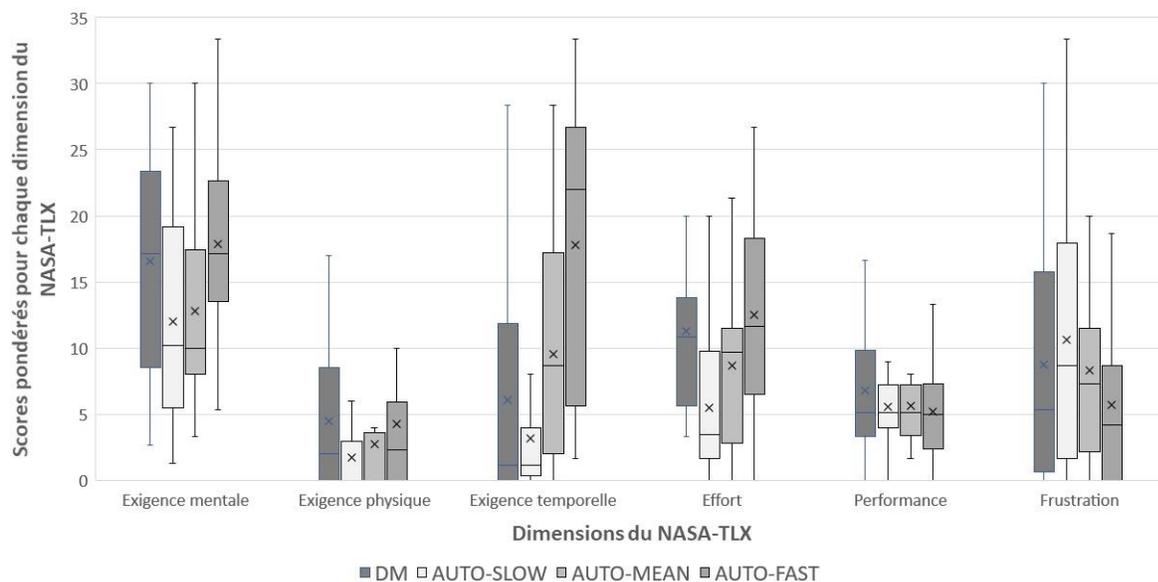


Figure 4 : Scores pondérés des six dimensions du NASA-TLX pour les quatre dimensions.

4 DISCUSSION

Dans cette expérience la cadence de travail a été modifiée : d'une part sa vitesse lorsque la cadence était imposée ; d'autre part son meneur, l'humain avec une cadence libre ou le cobot avec une cadence programmée et imposée. Les performances de production ont été mesurées, ainsi que les interactions entre le participant et le cobot, les sollicitations biomécaniques du participant, ses performances à la tâche auditive et sa charge de travail.

4.1 Cadence imposée : impact de son augmentation

4.1.1 Performances de production

Le nombre de produits fabriqués a augmenté lorsque la cadence est devenue de plus en plus importante, jusqu'à atteindre un plateau. Ce plateau semble indiquer que la cadence imposée était devenue trop importante pour l'opérateur qui ne pouvait plus la suivre. Ainsi, des produits n'étaient plus correctement fabriqués, menant à une augmentation du nombre d'erreurs de l'opérateur dans son travail, donc à une dégradation de la productivité (i.e., rapport entre les sorties et les entrées) comme en témoigne la diminution du pourcentage de produits correctement fabriqués dans cette expérimentation. Ces résultats concordent avec ceux de la littérature où ce nombre d'erreurs était plus important avec une forte cadence [8,16,41].

Ici la fatigue n'a pas été mesurée au cours d'un même essai. En effet, sur un essai de trois minutes la fatigue ne pouvait pas s'observer. Dans l'étude de Srinivasan (2014) [41], aucune dégradation de la performance n'avait été observé lors d'essais de sept minutes. En revanche, sur des périodes plus longues, nous ne pouvons pas exclure que les performances puissent se dégrader au fil du temps ; ainsi, étudier les effets de la vitesse de la cadence imposée sur les performances lors de sessions plus longues (i.e., une heure ou plus) pourrait approfondir la réflexion des répercussions à plus long terme sur la performance.

4.1.2 Qualité des interactions entre le participant et le cobot

En accélérant la cadence de production, le nombre d'actions à effectuer pour le participant et le cobot ont augmenté parallèlement, tandis que le temps pour les réaliser est resté similaire (trois minutes). Ainsi, la fréquence des actions était plus importante et nécessitait une coordination spatio-temporelle accrue des actions de chacun, pour maintenir une bonne fluidité de leurs interactions. La fluidité de l'interaction se définit comme la mesure de la fluidité d'un travail collaboratif entre un humain et un robot, donc de la qualité des interactions [24] Il a été observé ici moins de temps morts et plus de collaboration (et collaboration directe) entre le participant et le cobot lors de la cadence imposée la plus rapide. Ainsi, plus la cadence était rapide, meilleure était la fluidité des interactions, donc leur qualité [24,25]. La notion de temps morts telle que définit dans la littérature se réfère à la production et aux interactions, non au comportement moteur de l'opérateur. Avec une cadence trop faible, le taux plus important de temps morts semblait indiquer que les ressources étaient mal utilisées pour l'activité collaborative. Cependant, la diminution du taux de Temps mort avec l'augmentation de la cadence réduit également les temps de repos pour le travailleur humain [14]. Plus cette cadence était élevée, meilleure était la synchronisation entre l'humain et le cobot dans cette situation et les interactions étaient de haut niveau [22].

4.1.3 Sollicitations biomécaniques et TMS

Augmenter la cadence imposée demandait à l'opérateur d'agir plus souvent et plus rapidement pour effectuer ses actions dans le temps, correspondant à des facteurs d'apparition de TMS [33,42]. Dans cette étude, les sollicitations biomécaniques ont été analysées au niveau du tronc, de la nuque et des membres supérieurs par l'angulation des articulations en étudiant leur position moyenne pendant le temps de travail, mais également des évaluations RULA [34].

Les évaluations RULA ont montré ici que les postures étaient plus à risque avec une cadence plus élevée, et ces risques semblaient se situer au niveau du dos, des épaules et du coude. Les analyses plus fines de la cinématique des articulations ont semblé indiquer des résultats similaires, où les flexions du coude et de la nuque étaient plus importantes, et les articulations des épaules et des coudes étaient plus éloignées de leur position neutre. En position neutre, l'articulation avait un meilleur contrôle de la force et la production de cette force était maximale [11,35]. Cependant, plus l'articulation s'y éloignait et devait produire une force pour effectuer un geste, alors cette force produite diminuait. Pour compenser cette perte, une dépense d'énergie plus importante était nécessaire [35]. Pour analyser les répercussions des différentes cadences imposées sur l'activité musculaire, l'activité électrique du muscle peut être enregistrée, des études en électromyographie ont montré que, pour une tâche répétitive, l'activité musculaire était plus importante lorsque la cadence était plus rapide [17,31,33,42].

Ainsi, l'augmentation de la cadence imposée a induit des changements dans la posture et dans la stratégie de planification des mouvements de l'opérateur, comme dans l'étude de Bosch et ses collaborateurs (2011) [8]. Si l'opérateur travaille de manière répétée dans ces postures à des cadences trop élevées, alors celles-ci peuvent générer des TMS à long terme.

4.1.4 Ressources attentionnelles

L'augmentation de la cadence imposée semblait influencer les performances à la tâche auditive, en les réduisant. Les participants étaient placés dans une situation de double tâche, où seule la cadence de production imposée changeait. La diminution des performances à la seconde tâche (la tâche auditive) indique une augmentation du niveau de difficulté de la tâche principale [31], qui était ici la tâche motrice. En fait, l'augmentation de la cadence imposée a requis davantage de ressources attentionnelles pour maintenir les performances de production au maximum au détriment de l'autre tâche [36,37], car plus d'informations étaient à traiter pour réaliser celle-ci [1]. Cependant, il avait été demandé aux participants de ne prioriser aucune tâche, de réussir au maximum les deux tâches. C'est pourquoi les performances aux deux tâches ne sont plus optimales, et non pas les performances d'une seule tâche pour maintenir celles de l'autre tâche.

4.1.5 Charge de travail

La charge de travail a été évaluée subjectivement avec un NASA-TLX. Cette charge de travail perçue a augmenté avec la cadence imposée. Cette augmentation concernait principalement l'exigence mentale, l'exigence temporelle et l'effort. Concernant l'exigence temporelle, ceci est cohérent en raison de la pression

temporelle plus importante pour que l'opérateur puisse effectuer son action, car la fenêtre temporelle, accordée par le cobot pour le laisser réaliser son action, réduisait lorsque la cadence était plus rapide. L'effort est quant à lui lié à l'exigence mentale. En effet, pour y répondre, la question est « quel a été la difficulté d'accomplir (mentalement et physiquement) la tâche avec un niveau de performance tel que le vôtre ? » [10]. Les plus grands scores aux exigences mentale et temporelle lorsque la cadence devenait plus importante correspondaient avec la diminution de la productivité et l'augmentation des erreurs à la tâche auditive.

L'augmentation de la charge de travail est également à mettre en lien avec les risques d'apparition de TMS. Dans la littérature, il est admis qu'une charge de travail trop importante est un facteur de risques d'apparition de TMS [18,29,30]. Concernant les dimensions du NASA-TLX, il a été observé dans différentes études [6,13] des scores élevés pour l'exigence mentale et l'effort pour des personnes souffrants de TMS. Dans notre étude, l'exigence temporelle était également importante en raison de la cadence forte imposée, qui ne faisait pas partie des études précédentes. Nos résultats au NASA-TLX sont similaires à ces deux études, ceci indiquerait un risque accru d'apparition de TMS chez les opérateurs lorsque la cadence est trop importante.

4.2 Meneur ou suiveur de la cadence : impact du rôle de l'opérateur

Les participants ont eu le rôle de meneur de la cadence, où ils travaillaient avec une cadence libre, et le rôle de suiveur où la cadence leur était imposée. Dans ces deux situations, ils conservaient leur coordination proactive, c'est-à-dire qu'ils démarraient leurs actions dès qu'ils pouvaient [26]. En revanche, le contrôle de l'humain pouvait être prédictif lorsqu'il menait la cadence, mais pas lorsqu'elle était imposée. Quant au cobot, son comportement dépendait de sa programmation. Lorsqu'il était le suiveur, il attendait que le participant lui donne la consigne d'effectuer son action avec une télécommande, tandis que lorsqu'il était meneur, son programme l'activait selon des algorithmes, pour agir à la cadence imposée.

4.2.1 Performances aux tâches

Tout d'abord, il est intéressant d'observer que les performances à la tâche motrice lorsque le participant mène la cadence de production ($4,16 \pm 0,50$ produits et $16,88 \pm 2,41$ étapes) semblent similaires à celles attendues avec la cadence imposée moyenne (4 produits et 16 étapes). Ces résultats semblent différer de ceux présents dans la littérature, où lorsque l'opérateur menait la cadence de production, celle-ci était plus importante que lorsqu'elle lui était imposée [14]. Ceci peut s'expliquer par deux raisons principales. D'une part, le nombre d'étapes à réaliser dans la cadence imposée a été choisie à partir des performances de production d'une expérience sur 34 participants [9] qui ont réalisé la même tâche motrice que dans la condition DM de cette étude, les objectifs des cadences lentes et rapides ayant été choisies arbitrairement. D'autre part, lorsque les participants menaient la cadence, ils devaient actionner le cobot, qui avait une vitesse d'exécution pas très importante, empêchant les participants de travailler pleinement à la cadence souhaitée.

En observant le nombre de produits ayant été correctement fabriqués, lorsque le participant menait la cadence de production, ce nombre était similaire à celui de la cadence imposée moyenne, mais aussi à celui de la cadence imposée rapide en raison des erreurs à cette cadence. En revanche, le nombre d'étapes réussies était plus important en menant la cadence que lorsqu'elle était imposée en cadence moyenne mais moins

importante que lors de la cadence imposée rapide. Ainsi, mener la cadence de production semblait bénéfique pour la production, et notamment pour l'efficacité de production dans cette situation collaborative.

Les résultats des performances de production conduisent à nous intéresser particulièrement à la comparaison des conditions DM et AUTO-MEAN, où finalement la production est très proche lorsque l'opérateur mène ou suit la cadence.

4.2.2 *Qualité des interactions*

Le rôle de l'opérateur (i.e., meneur ou suiveur) ne semble pas influencer la qualité des interactions entre celui-ci et le cobot. En effet, autant de temps morts et de collaboration ont été observés dans les conditions DM et AUTO-MEAN. Cependant, le taux de collaboration directe était moins important lorsque le participant menait la cadence de production. En raison des coordinations de l'opérateur et du cobot [26], et des raisons techniques de fonctionnement du cobot, l'opérateur ne pouvait plus agir directement sur le produit lorsque le cobot était en activité sur le produit en cours. Cependant, l'opérateur pouvait entamer son action dans la zone collaborative lorsque le cobot terminait la sienne (i.e., insérer un écrou dans le carénage ou y insérer le produit SFP).

Puisque le nombre d'actions était similaire entre les deux conditions, la différence du taux de collaboration directe pourrait s'expliquer par le fait que les participants démarraient leur action directement sur le produit moins rapidement lorsqu'ils menaient la cadence que lorsqu'ils la subissaient. Le délai fonctionnel, variable décrite par Hoffman (2019) [24], mesure le temps entre la fin de l'action de l'un et le début de celle de l'autre. Cette variable pourrait répondre à cette hypothèse en calculant le temps entre la fin d'une action du cobot et le début de celle des participants, pour observer l'influence de la pression temporelle sur son action.

Lorsqu'un opérateur mène la cadence de production, il a été montré que ses performances étaient meilleures qu'une cadence imposée dite « moyenne » [14]. Dans cette étude de Dempsey et ses collaborateurs (2010), les auteurs ont observé que malgré une diminution du temps de cycle en menant la cadence, celle-ci n'était pas la conséquence d'actions motrices plus rapides de l'opérateur, mais d'une réduction de ses temps de récupération. Dans notre étude, les interactions étaient dépendantes de la vitesse du cobot. Les participants devaient généralement attendre avant de pouvoir exécuter son action, même lorsque c'était lui qui menait la cadence.

4.2.3 *Sollicitations biomécaniques et TMS*

Les scores RULA globaux et segmentaires ne différaient pas entre la cadence imposée moyenne et la cadence menée par le participant. De plus, la position moyenne de l'articulation pour les mouvements étudiés ici semblait similaire à l'exception d'une plus grande flexion de l'épaule gauche et d'une grande flexion du poignet droit. Dans cette étude, la cadence imposée moyenne reposait sur des performances d'une expérience précédente [9] où les participants avaient fabriqué les produits à cette cadence, alors que celle-ci était libre. Ainsi, la cadence imposée moyenne correspondait à une cadence qui convenait à la vitesse du participant, ce qui expliquerait les faibles différences observées entre ces deux conditions.

Cependant, dans l'analyse de cette tâche motrice, celle-ci prend en compte plusieurs mouvements différents. Par conséquent, les mesures ne sont pas effectuées sur un geste précis mais sur une multitude de gestes, contrairement à d'autres études [16,17,32,41]. Il serait intéressant de décomposer les différentes

actions de l'opérateur pour comparer les mêmes gestes lorsqu'il mène la cadence (i.e., c'est lui qui décide quand effectuer le geste) et lorsqu'il la subit (i.e., une fenêtre temporelle lui est imposée par le cobot) dans une situation collaborative humain-cobot. De plus, une analyse EMG permettraient d'étudier la variabilité au niveau musculaire pour s'intéresser à une possible fatigue de ceux-ci [32,40].

4.2.4 Ressources attentionnelles

Les performances à la tâche auditive étaient similaires lorsque le participant était meneur de la cadence et quand il était suiveur de la cadence moyenne. De plus, les performances étaient meilleures qu'avec la cadence la plus rapide et inversement pour la cadence la moins rapide. Ces résultats semblent indiquer, qu'à production similaire quel que soit le rôle de l'opérateur, le niveau de difficulté est identique [31], et que malgré la pression temporelle, les ressources attentionnelles nécessaires s'orientaient de la même façon [1].

4.2.5 Charge de travail

A production similaire, mener ou subir la cadence ne semble pas avoir d'influence sur la charge de travail perçue. En effet, les scores globaux et des différentes dimensions du NASA-TLX étaient similaires entre les conditions DM et AUTO-MEAN. Lorsque la cadence imposée était différente de celle menée, les différences de scores étaient similaires avec celles de la cadence imposée moyenne.

La perte de la cadence de production réduit l'autonomie de l'opérateur, qui devient dépendant de la cadence du travail du cobot. Cependant, cette réduction n'a pas modifié la charge de travail, qui est un des facteurs à risque de TMS [18,29].

4.3 Limites de la situation expérimentale

La population étudiée était constituée d'étudiants non experts du travail avec un robot collaboratif, ce qui a notamment permis de contrôler leur expertise. Cependant, des études montrent que l'expertise d'un opérateur dans sa tâche de travail permet une amélioration de ses performances (i.e., temps, coût, erreurs) [3], nos résultats auraient donc probablement différé avec une population plus experte.

De la même manière, la situation de travail dans cette étude est inspirée de situation de travail réelle où humain et cobot travaillent sur un plan même plan de travail, qui est donc collaboratif, dans le but de fabriquer un produit avec des sous-tâches effectuées de manière synchrone ou asynchrone. Dans la tâche de travail dans cette étude, les présences du cobot et de l'humain sont justifiées. En effet, le cobot permet de partager les sous-tâches de fabrication et d'effectuer celles avec une forte sollicitation biomécanique (i.e., effectuer une rotation au produit) tandis que l'humain par sa dextérité fine pouvait assurer certaines sous-tâches (i.e., insérer l'écrou et visser) [22]. Malgré cela, cette étude s'est déroulée en laboratoire, ce qui a un effet certain sur les résultats observés.

Ainsi, pour généraliser nos résultats de cette étude, il faudrait pouvoir les répliquer lors d'un contexte plus écologique avec des opérateurs, formés ou non au travail collaboratif, dans une situation de travail réelle.

5 CONCLUSION

Lors de cette tâche collaborative entre un opérateur humain et un cobot, l'augmentation d'une cadence imposée a amélioré les interactions entre l'humain et le cobot et augmenté la production, jusqu'à un certain seuil de cadence où l'opérateur ne pouvait plus suivre. Cependant, une cadence plus importante a également augmenté les erreurs de l'opérateur dans ses tâches, la demande attentionnelle, les sollicitations biomécaniques ainsi que la charge de travail perçue. La santé du travailleur, notamment en termes de TMS, devient plus à risque. En revanche, mener la cadence a semblé légèrement bénéfique pour la production, mais n'a pas semblé influencer ni les interactions ni les sollicitations biomécaniques ni le charge de travail perçue, en comparaison d'une cadence imposée à la même vitesse. Les modifications de ces différents paramètres semblent être causées par la cadence et non par le meneur, même si ces résultats devront être reproduits en situation écologique.

Par conséquent, dans une situation de travail collaborative entre un opérateur et un cobot, la vitesse de la cadence de production doit être en adéquation avec les capacités de l'opérateur à réaliser sa tâche, sans mettre en danger sa santé par des sollicitations ou une charge de travail trop importantes pour lui. La cadence de travail est un paramètre à penser lors de l'introduction d'un cobot dans une situation de travail, pour notamment faciliter l'acceptation de cette nouvelle technologie sans craindre d'influencer négativement la productivité ou le capital santé des opérateurs.

REMERCIEMENTS

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet universitaire C-SHIFT (Cobots in the Service of Human activity at work in consistence with the challenge of Industry of the FuTure), financée par Impact-LUE (Lorraine University of Excellence). Nous remercions l'AIP Lorrain, en particulier sa directrice Dr Muriel Lombard, de nous avoir accueillis dans ses locaux afin de réaliser l'ensemble des expérimentations. Nous remercions également l'orthophoniste Amélie Dumont pour l'enregistrement des lettres de la tâche auditive.

RÉFÉRENCES

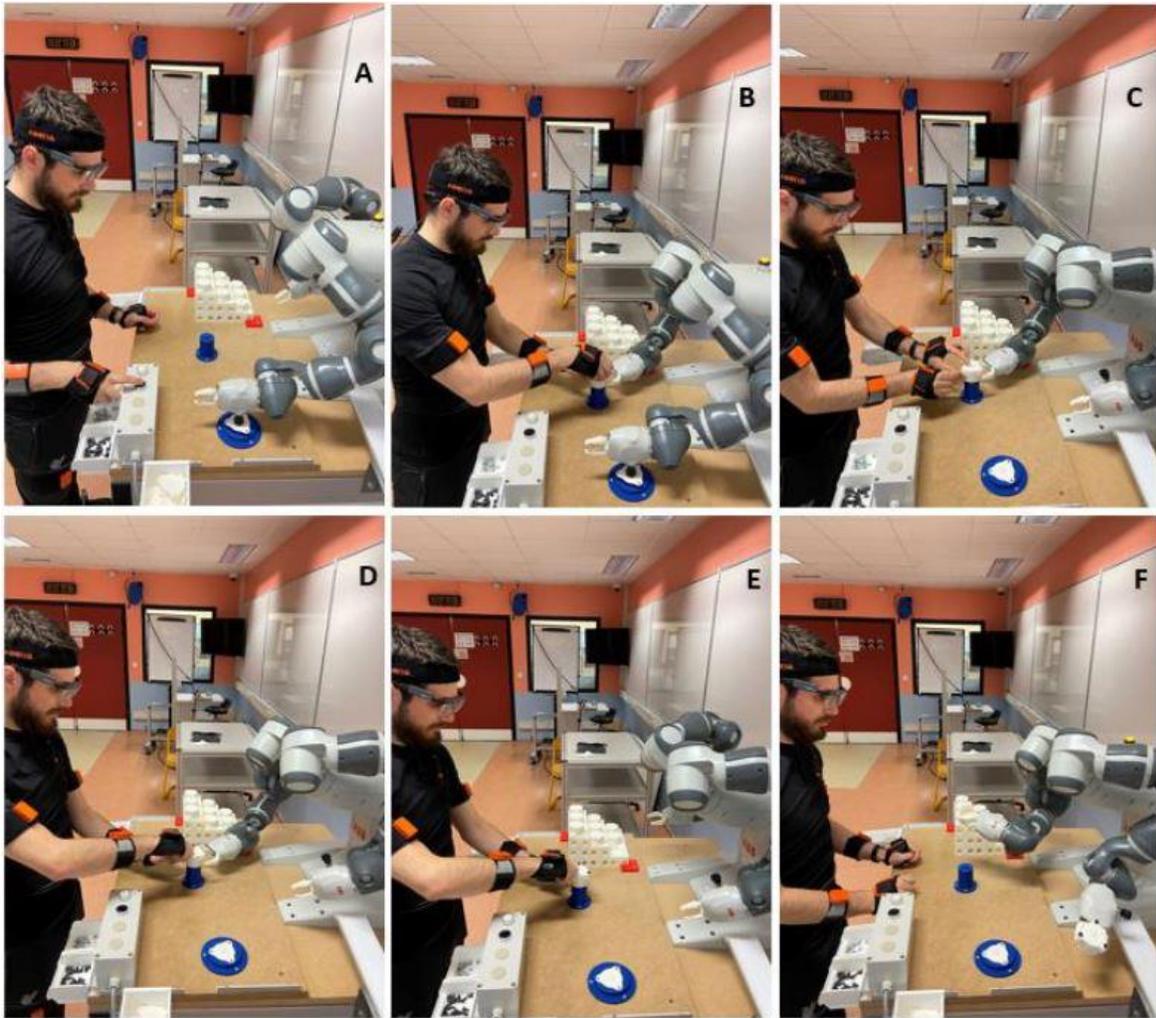
- [1] Stephen S. Bao, Jay M. Kapellusch, Andrew S. Merryweather, Matthew S. Thiese, Arun Garg, Kurt T. Hegmann, and Barbara A. Silverstein. 2016. Relationships between job organisational factors, biomechanical and psychosocial exposures. *Ergonomics* 59, 2 (2016), 179–194. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1065347>
- [2] Benoit G Bardy. 1991. Le paradigme d la double tâche. *Science et motricité* 15, (1991), 31–39.
- [3] Martin Baumers and Matthias Holweg. 2019. On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. *Jrnl of Ops Management* 65, 8 (December 2019), 794–809. DOI:<https://doi.org/10.1002/joom.1053>
- [4] Kathleen Belhassein, Victor Fernandez-Castro, Amandine Mayima, Aurélie Clodic, Elisabeth Pacherie, Michèle Guidetti, Rachid Alami, and Hélène Cochet. 2021. Addressing joint action challenges in HRI: Insights from psychology and philosophy. *Acta Psychologica* 222, (2021), 103476.
- [5] Bruce P. Bernard and Vern Putz-Anderson. 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*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DOI:<https://doi.org/10.26616/NIOSH PUB97141>
- [6] Alireza Besharati, Hadi Daneshmandi, Khodabakhsh Zareh, Anahita Fakherpour, and Mojgan Zoaktafi. 2020. Work-related musculoskeletal problems and associated factors among office workers.

- International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 26, 3 (2020), 632–638.
DOI:<https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1501238>
- [7] Paulien M. Bongers, Stefan Ijmker, Sander van den Heuvel, and Brigitte M. Blatter. 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). *J Occup Rehabil* 16, 3 (2006), 272–295. DOI:<https://doi.org/10.1007/s10926-006-9044-1>
- [8] Tim Bosch, Svend Erik Mathiassen, Bart Visser, Michiel P. de Looze, and Jaap H. van Dieën. 2011. The effect of work pace on workload, motor variability and fatigue during simulated light assembly work. *Ergonomics* 54, 2 (2011), 154–168. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140139.2010.538723>
- [9] Kévin Bouillet, Sophie Lemonnier, Gérôme Gauchard, and Fabien Clanché. 2021. Etude multimodale de la performance motrice et du comportement oculomoteur lors d'une tâche collaborative Homme-cobot. In *32 me conférence internationale francophone sur l'interaction Homme-Machine*, Metz, France, 6.
- [10] Julien Cegarra and Nicolas Morgado. 2009.  tude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. In *5 me colloque de psychologie ergonomique (Epique)*, Epique 2009, Nice, France, 28–30.
- [11] Don B Chaffin, Gunnar BJ Andersson, and Bernard J Martin. 2006. *Occupational biomechanics*. John Wiley & Sons, Inc, New York, NY.
- [12] Daniela Colombini. 1998. An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41, 9 (1998), 1261–1289. DOI:<https://doi.org/10.1080/001401398186306>
- [13] Ebrahim Darvishi, Afshin Maleki, Omid Giahi, and Arash Akbarzadeh. 2016. Subjective Mental Workload and Its Correlation With Musculoskeletal Disorders in Bank Staff. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics* 39, 6 (2016), 420–426. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2016.05.003>
- [14] Patrick G. Dempsey, Svend Erik Mathiassen, Jennie A. Jackson, and Niall V. O'Brien. 2010. Influence of three principles of pacing on the temporal organisation of work during cyclic assembly and disassembly tasks. *Ergonomics* 53, 11 (2010), 1347–1358. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140139.2010.520745>
- [15] Digby Elliott, Steven Hansen, Jocelyn Mendoza, and Luc Tremblay. 2004. Learning to Optimize Speed, Accuracy, and Energy Expenditure: A Framework for Understanding Speed-Accuracy Relations in Goal-Directed Aiming. *Journal of Motor Behavior* 36, 3 (2004), 339–351. DOI:<https://doi.org/10.3200/JMBR.36.3.339-351>
- [16] Reuben Escorpizo and Anne Moore. 2007. The effects of cycle time on the physical demands of a repetitive pick-and-place task. *Applied Ergonomics* 38, 5 (2007), 609–615. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.06.009>
- [17] Chad E. Gooyers and Joan M. Stevenson. 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 (2012), 80–89. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.005>
- [18] Ehsanollah Habibi, Mohamad Reza Taheri, and Akbar Hasanzadeh. 2015. Relationship between mental workload and musculoskeletal disorders among Alzahra Hospital nurses. *Iranian Journal of Nursing and Midwifery Research* 20, 1 (2015), 6.
- [19] Sandra G Hart. 2006. Nasa-task load index (NASA-TLX); 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Sage). CA: Los Angeles, 904–908.
- [20] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology*. Elsevier, 139–183. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- [21] Melanie J. Hayes, Deborah Cockrell, and Derek R. Smith. 2009. A systematic review of musculoskeletal disorders among dental professionals. *International Journal of Dental Hygiene* 7, 3 (2009), 159–165. DOI:<https://doi.org/10.1111/j.1601-5037.2009.00395.x>
- [22] Abdelfetah Hentout, Mustapha Aouache, Abderraouf Maoudj, and Isma Akli. 2019. Human–robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008–2017. *Adv Robot* 33, 15–16 (2019), 764–799. DOI:<https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1636714>
- [23] Sue Hignett and Lynn McAtamney. 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics* 31, 2 (2000), 201–205. DOI:[https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- [24] Guy Hoffman. 2019. Evaluating fluency in human–robot collaboration. *IEEE Trans Hum Mach Syst* 49, 3 (2019), 209–218. DOI:<https://doi.org/10.1109/THMS.2019.2904558>

- [25] Guy Hoffman and Cynthia Breazal. 2007. Cost-based anticipatory action selection for human-robot fluency. *IEEE Trans Robot* 23, 5 (2007), 952–961. DOI:<https://doi.org/10.1109/TRO.2007.907483>
- [26] Chien-Ming Huang, Maya Cakmak, and Bilge Mutlu. 2015. Adaptive coordination strategies for Human-robot handovers. In *Robotics: science and systems*, Roma, 1–10. Retrieved April 19, 2021 from <http://m.roboticsproceedings.org/rss11/p31.pdf>
- [27] International Federation of Robotics. 2021. *World robotics 2021 industrial robots*. Retrieved February 2, 2022 from <https://www.vdmashop.de/World-Robotics-228/World-Robotics-2020-Industrial-Robots---PDF-Edition-1724.html>
- [28] Malin Josephson, Monica Lagerstrom, Mats Hagberg, and Ewa Wigaeus Hjelm. 1997. Musculoskeletal symptoms and job strain among nursing personnel: a study over a three year period. *Occupational and Environmental Medicine* 54, 9 (1997), 681–685. DOI:<https://doi.org/10.1136/oem.54.9.681>
- [29] Mohammad Khandan, Fatemeh Mirshekari, Elham Koorsani, Saeedeh Mosaferchi, and Alireza Koochpaei. 2018. Subjective workload and musculoskeletal disorders among workers of a manufacturing company in Iran. *Biotech Health Sciences* 5, 1 (2018), 1–6.
- [30] Pernilla Larsman and Jan Johansson Hanse. 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 (2009), 442–446. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2009.01.002>
- [31] Bjarne Laursen, Bente Rona Jensen, and Gisela Sjøgaard. 1998. Effect of speed and precision demands on human shoulder muscle electromyography during a repetitive task. *European Journal of Applied Physiology* 78, 6 (1998), 544–548. DOI:<https://doi.org/10.1007/s004210050458>
- [32] Karen V. Lomond and Julie N. Côté. 2010. Movement timing and reach to reach variability during a repetitive reaching task in persons with chronic neck/shoulder pain and healthy subjects. *Exp Brain Res* 206, 3 (2010), 271–282. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00221-010-2405-1>
- [33] Svend Erik Mathiassen and Jørgen Winkel. 1996. Physiological comparison of three interventions in light assembly work: reduced work pace, increased break allowance and shortened working days. *Int. Arch Occup Environ Health* 68, 2 (1996), 94–108. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF00381241>
- [34] Lynn McAtamney and E Nigel Corlett. 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl Ergon* 24, 2 (1993), 91–99. DOI:[https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)
- [35] Susan M Moore, Janet Torma-Krajewski, and Lisa J Steiner. 2011. *Practical demonstrations of ergonomic principles*. NIOSH, Department of health and human services, Pittsburg, PA.
- [36] Natalie Richer and Yves Lajoie. 2019. Cognitive task modality influences postural control during quiet standing in healthy older adults. *Aging Clin Exp Res* 31, 9 (2019), 1265–1270. DOI:<https://doi.org/10.1007/s40520-018-1068-9>
- [37] Rabee Rustum and Adebayo J. Adelaye. 2007. Replacing Outliers and Missing Values from Activated Sludge Data Using Kohonen Self-Organizing Map. *J. Environ. Eng.* 133, 9 (September 2007), 909–916. DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2007\)133:9\(909\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2007)133:9(909))
- [38] Martin Schepers, Matteo Giuberti, and Giovanni Bellusci. 2018. *Xsens MVN: Consistent tracking of human motion using inertial sensing*. Retrieved January 19, 2022 from 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
- [39] N Keerthi Shravani and Sri Rao. 2018. Introducing robots without creating fear of unemployment and high cost in industries. *Int J Eng Technol Sci Res* 5, 1 (2018), 1128–1135.
- [40] Divya Srinivasan and Svend Erik Mathiassen. 2012. Motor variability in occupational health and performance. *Clinical Biomechanics* 27, 10 (2012), 979–993. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2012.08.007>
- [41] Divya Srinivasan, Afshin Samani, Svend Erik Mathiassen, and Pascal Madeleine. 2015. The size and structure of arm movement variability decreased with work pace in a standardised repetitive precision task. *Ergonomics* 58, 1 (2015), 128–139. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140139.2014.957736>

- [42] Gunnevi Sundelin. 1993. Patterns of electromyographic shoulder muscle fatigue during MTM-paced repetitive arm work with and without pauses. *Int. Arch Occup Environ Health* 64, 7 (1993), 485–493. DOI:<https://doi.org/10.1007/BF00381096>
- [43] Panagiota Tsarouchi, Sotiris Makris, and George Chryssolouris. 2016. Human-robot interaction review and challenges on task planning and programming. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29, 8 (2016), 916–931. DOI:<https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130251>
- [44] Céline Uguen, Sandra Sablon, and Gabriel Carballeda. 2018. Intégration de la préparation physique dans l'approche ergonomique : quel dispositif pour quel(s) objectif(s) ? *Activités* 15, 2 (2018), 1–34. DOI:<https://doi.org/10.4000/activites.3537>

ANNEXE



Annexe 1 : Différentes étapes de production lors de la situation collaborative. A/ Le participant appuie sur la télécommande pour déclencher l'action du cobot. B/ Le participant insère le produit SFP dans le carénage. C/ Le participant vise une première fois. D/ Après une rotation du produit par le cobot, le participant vise une deuxième fois. E/ Après une seconde rotation du produit par le cobot, le participant visse une troisième fois. F/ Le cobot évacue le produit fini et amène le carénage pour le produit suivant.

Annexe 2 : Scores RULA pour les articulations évaluées (dos, nuque, épaules, coudes et poignets) lors des évaluations RULA des deux côtés

	Dos	Nuque	Epaules		Coudes		Poignets	
			Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
DM	2,44 (0,53)	2,13 (1,15)	2,50 (0,30)	2,35 (0,22)	2,49 (0,38)	1,87 (0,48)	2,50 (0,25)	2,56 (0,24)
AUTO-SLOW	2,27 (0,76)	1,92 (0,53)	2,38 (0,14)	2,31 (0,16)	2,41 (0,39)	1,95 (0,33)	2,61 (0,29)	2,62 (0,18)
AUTO-MEAN	2,51 (0,82)	1,93 (0,70)	2,48 (0,20)	2,32 (0,25)	2,40 (0,41)	1,81 (0,37)	2,51 (0,33)	2,55 (0,26)
AUTO-FAST	2,70 (0,64)	1,83 (0,60)	2,56 (0,18)	2,36 (0,29)	2,29 (0,45)	1,77 (0,37)	2,47 (0,37)	2,62 (0,29)