



HAL
open science

Protocole expérimental visant l'étude de l'IA centrée sur l'humain dans le contexte de l'Industrie 5.0 : Application en réalité augmentée

Laurent Joblot, Magnani Florian, Frédéric Rosin, Robert Pellerin, Mario Passalacqua

► To cite this version:

Laurent Joblot, Magnani Florian, Frédéric Rosin, Robert Pellerin, Mario Passalacqua. Protocole expérimental visant l'étude de l'IA centrée sur l'humain dans le contexte de l'Industrie 5.0 : Application en réalité augmentée. CIGI QUALITA MOSIM 2023, Jun 2023, Trois Rivières, Canada. hal-04142374

HAL Id: hal-04142374

<https://hal.science/hal-04142374v1>

Submitted on 26 Jun 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.

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Protocole expérimental visant l'étude de l'IA centrée sur l'humain dans le contexte de l'Industrie 5.0: Application en réalité augmentée

Joblot Laurent*, Magnani Florian**, Rosin Frédéric***, Passalacqua Mario**** Pellerin Robert****

*Arts et Metiers Institute of Technology, LISPEN / HESAM University / UBFC, Chalons-sur-Saône France

e-mail: laurent.joblot@ensam.eu

** Aix Marseille University, CERGAM, Aix-en-Provence, France

e-mail: florian.magnani@centrale-marseille.fr

*** LAMIH UMR CNRS 8201, Arts et Métiers Paris ParisTech, Paris, France

e-mail: frederic.rosin@ensam.eu

**** Département de Mathématiques et de Génie Industriel, Polytechnique Montréal, Canada

e-mail: mario.passalacqua@polymtl.ca

Résumé – L'objectif affiché de la transformation numérique opérée dans le cadre de l'Industrie 4.0 est de créer une entreprise apprenante, agile et capable de s'adapter à des conditions changeantes en utilisant de nouvelles technologies. Cependant, après une décennie de développements, les résultats restent très mitigés notamment en raison d'une approche trop technocentrée. Par opposition, l'Industrie 5.0 se définit aujourd'hui comme une approche centrée sur l'humain, incluant des considérations sociales, sociétales et environnementales. L'évolution vers de nouveaux modèles d'organisations agiles implique notamment une autonomie renforcée des équipes s'appuyant sur des prises de décision améliorées et accélérées. Cependant, la question de l'influence des technologies 4.0 sur les performances, la motivation, l'engagement et la charge cognitive des employés en production reste globalement en suspens. Cet article présente le cadre expérimental développé pour combler cette lacune via l'utilisation d'une Intelligence Artificielle couplée à de la Réalité Augmentée. Les choix, les orientations le protocole expérimental et la méthodologie retenus sont discutés avant les phases de tests/mise en œuvre opérationnelle du dispositif développé. Les résultats obtenus permettront de déterminer les principaux facteurs clés de succès/échec pour la mise en œuvre de systèmes couplant IA et RA permettant d'obtenir l'adhésion et l'engagement des équipes pour une autonomie renforcée.

Abstract – Industry 4.0's primary goal is generally to create a learning and agile enterprise, capable of adapting continuously to changing conditions through new technologies' utilization. However, the results of previous developments remain mitigated, mainly due to a primarily techno-centric approach. In contrast, the concept of Industry 5.0 is now defined as a human-centred approach, including social, societal, and environmental considerations. The evolution towards new models of agile organizations implies, in particular, greater autonomy for teams based on improved and accelerated decision-making. However, I4.0 technology's influence on the performance, motivation, engagement, and cognitive load of employees in a production setting remains largely under-researched. In this article, we present an experimental methodology to address this gap. We discuss its future application to a use case in which artificial intelligence (AI) and augmented reality (AR) are implemented to aid the operator in an error-detection manufacturing task. Finally, the methodological choices are elucidated, in preparation for the upcoming testing and operational implementation phases of the system. Results from the application of the experimental methodology will be used to identify the key factors contributing to the success and failure of AI and AR system design and implementation. Ultimately, we aim to understand how to promote positive outcomes for the employees using the system, in terms of performance, engagement, motivation, and autonomy.

Mots clés - Industrie 5.0, Intelligence Artificielle (IA) centrée sur l'humain, Réalité Augmentée (RA), motivation, engagement, H-CPPS.

Keywords – Industry 5.0, human-centered Artificial Intelligence (AI), Augmented Reality (AR), motivation, engagement, H-CPPS.

1 INTRODUCTION ET JUSTIFICATION.

En une décennie, le concept d'Industrie 4.0 (I4.0) s'est imposé comme le paradigme dominant de la transformation numérique de l'industrie manufacturière au niveau mondial. En plaçant l'humain au centre, l'I4.0 est présentée comme le socle de la création de valeur basée sur les données, des modèles commerciaux innovants et des formes d'organisation agiles [Kagermann and Wahlster 2022].

Cependant une étude récente [Schuh et al. 2020] publiée dans le cadre du Consortium Acatech, après avoir réalisé plus de soixante-dix études sur les stades de maturité d'entreprises impliquées dans le déploiement de l'I4.0, montre que seule une petite proportion d'entreprises a réellement commencé la mise en œuvre à grande échelle de l'I4.0. Il ressort notamment que le problème le plus évident rencontré par les entreprises est qu'elles ont tendance à se concentrer davantage sur la mise en œuvre de prototypes et d'études technologiques isolées que sur

des programmes de transformation cohérents à l'échelle de l'entreprise.

Les évolutions liées à l'I4.0 ne peuvent être abordées uniquement sous un angle purement technologique. La numérisation exige également que les entreprises transforment leur organisation et leur culture afin de devenir aussi flexibles et adaptatives que possible [Schuh et al. 2020]. La clé d'une transformation vers l'I4.0 réussie ne repose pas seulement sur l'implication du personnel, mais aussi sur la mise à disposition des moyens leur permettant de façonner les processus impactés par la transformation [Schuh et al. 2020]. Dès lors, la mise en œuvre des nouveaux modèles d'organisations agiles repose sur des employés engagés et plus autonomes s'appuyant sur les technologies de l'I4.0 pour des prises de décision améliorées conduisant à des adaptations accélérées.

Dans ce contexte, les questions de recherche suivantes apparaissent aujourd'hui prépondérantes :

Comment une technologie ou un ensemble de technologies 4.0 influe-t-il sur les performances, la motivation, l'engagement et la charge cognitive des travailleurs dans un contexte de production ?

Comment pouvons-nous aborder la conception et la mise en œuvre d'une technologie ou d'un ensemble de technologies 4.0 (en l'occurrence IA + RA dans cet article) de manière à obtenir des résultats positifs pour les collaborateurs ?

De précédents travaux ont permis de préciser le cadre de recherche retenu. Rosin et al. [2021] ont proposé un modèle de types d'autonomies s'appuyant sur le renforcement des différentes étapes des processus décisionnels par les technologies de l'I4.0.

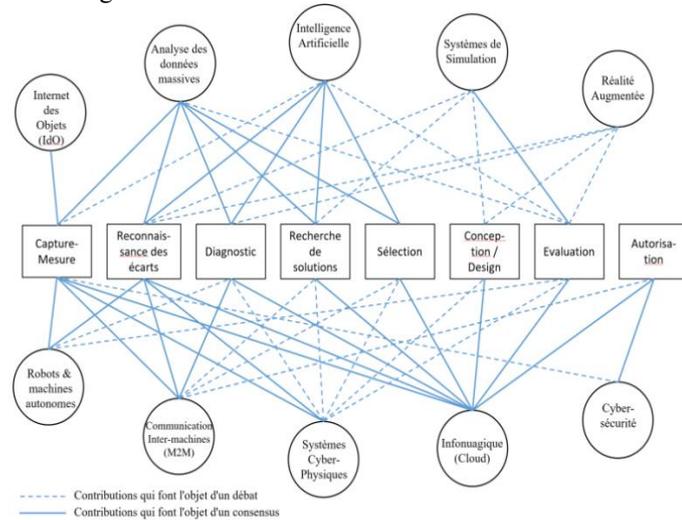


Figure 1. Contributions des technologies de l'I4.0 qui font l'objet d'un consensus ou d'un débat pour le renforcement du processus de décision (Rosin & al., 2021)

Ces mêmes auteurs ont par la suite mené une étude prospective auprès d'un panel représentatif d'experts qui a permis d'identifier (figure 1) et de caractériser le potentiel d'amélioration du processus global de prise de décision par les principaux groupes de technologies de l'I4.0 [Rosin et al. 2022].

¹ Requête complète : TITLE-ABS-KEY (("human centered" OR "user centered" OR "human centred" OR "user centred" OR "human factor*" OR ergonom* OR sociotechnical OR socio-technical OR anthropocentric OR psychosocial OR psychophysiology* OR motivation OR engagement OR stress OR "cognitive load" OR "cognitive workload" OR fatigue OR "well being" OR well-being OR empowerment OR trust OR distrust OR acceptance OR acceptability OR personality OR comprehensib* OR understandab* OR explainab* OR vigilance OR "job satisfaction" OR "work satisfaction" OR usability OR "User Experience" OR ux OR autonomy OR attention OR concentration OR focus OR engagement) AND ("Augmented reality" OR "RA" OR "AR" OR "mixed

La RA est apparue comme étant une des technologies prêtant le plus à dissensus par les experts interrogés. Elle propose, dans un environnement semi-virtuel, une expérience interactive de la réalité dotant la personne qui l'utilise d'informations supplémentaires non accessible dans l'environnement réel. La pertinence de ce groupe technologique reste mitigée pour renforcer certaines étapes du processus de décision et notamment les premières, à savoir « Reconnaissance d'un problème ou d'une opportunité » et « Diagnostic ». Cependant, la majorité des experts pense que l'utilisation de la RA ne présente vraiment d'intérêt que couplée avec d'autres groupes technologiques et notamment l'IA. Cet article présente une étude visant à traiter les questions de recherche ciblées dans le cas de l'utilisation de la RA couplée à une IA pour renforcer la première étape du processus de décision. Celle-ci vient compléter une première étude qui a permis d'explorer sur ce même périmètre, l'effet de la fiabilité de l'IA sur la motivation, l'engagement et la performance des employés [Passalacqua, et al. 2023].

L'article est structuré comme suit. La section 2 présente une revue de la littérature sur les expérimentations menées à ce jour autour de la RA. Nous démontrerons la nécessité de poursuivre les travaux autour des questions génériques de recherche ciblées, mais plus spécifiquement avec de la RA projetée. La section 3 s'intéresse aux réalités et limites des technologies disponibles. La section 4 justifie et décrit la conception du dispositif, le protocole expérimental et la méthodologie de recherche visée. La section 5 présente les résultats préliminaires et quelques perspectives de recherche.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 RA centrée sur l'humain

La RA représente une des technologies utilisées dans le cadre de l'I4.0 et de l'Industrie 5.0. Mobilisée seule ou combinée à de l'intelligence artificielle (IA), elle est censée apporter son lot de bénéfices tant en performances opérationnelles qu'en performances humaines [Sharma et al. 2021].

Pour valider à la fois le besoin et la pertinence de notre travail introduit en partie 1, un approfondissement de la littérature a donc été réalisé. Notre analyse de l'existant a pour origine la requête utilisée pour la revue systématique « Human-Centred AI in the Age of Industry 5.0: A Systematic Review Protocol » [Passalacqua et al. 2022]. A cette requête « générique », ont été ajoutés les mots clés « AND ("Augmented reality" OR "RA" OR "AR" OR "mixed reality" OR "XR") AND (production OR lean OR "quality control" OR assembl*) » pour coller au mieux à notre question de recherche¹. Sur la base de données Scopus, 288 articles de revue ressortent de cette requête. Les thèmes abordés sont très variés allant de la « gamification » au développement d'algorithmes, en passant par des problématiques d'usinage, de matériaux, de captation de données, de simulation, de prédiction, le tout parfois centré sur

reality" OR "XR") AND (production OR lean OR "quality control" OR assembl*)) AND ("artificial intelligence" OR ai OR ml OR "deep learning" OR "data mining" OR "machine learning" OR rl OR "reinforcement learning" OR "supervised learning" OR "unsupervised learning" OR "autonomous agent*" OR "intelligent agent*" OR "neural network" OR "machine intelligence") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"COMP")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE,"English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE,"French"))

la question du jumeau numérique du site de production. Une revue détaillée sera proposée ultérieurement, mais il ressort des 33 études scientifiques exploitables et pertinentes à la vue de nos questions de recherche (cf justifications et critères utilisés en partie 2.3) que les auteurs cherchent en priorité à valider des développements, des associations de concepts et technologies 4.0 ou des applications dans des domaines spécifiques et couvrent en priorité les champs présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Thèmes abordés à l'issue de notre requête.

Question traitée / Domaine visé	Nb d'articles
Développement de solutions/technologies/algorithmes	9
Revue de littérature	5
Maintenance	5
Formation / Apprentissage	4
Comparatif	4
Acceptation de technologie	3
Education	1
5.0	1
Interaction Homme Machine	1

Lorsqu'il est question d'étudier l'IA « intégrée » aux solutions de RA, les chercheurs s'accordent à dire que cette combinaison aura des implications majeures pour l'amélioration de la productivité, la détection et gestion des erreurs ainsi que la formation des employés [Devagiri et al. 2022]. Cependant, il s'avère que les travaux portaient essentiellement sur les fonctionnalités, les briques technologiques ou les limites inhérentes aux matériels disponibles [Sahu et al. 2020].

2.2 Expérimentations et déploiement de RA dans l'industrie

De façon générale, la RA semble intéresser les industriels principalement lors d'opérations d'assemblage, soit dans le cadre de la formation, soit comme système de guidage en direct pour les opérateurs. Certains auteurs parlent alors d'IAR « Industrial Augmented Reality » [Masood and Egger 2020]. En logistique, le « pick-to-light » est un concept important qui utilise également la RA pour indiquer les emplacements et les quantités à prélever. GE Healthcare propose notamment à ses magasiniers un outil industriel de RA pour rassembler et préparer les commandes avec un gain de productivité annoncé² de +46 %. Au-delà de ces aides au sein des entrepôts, ces technologies trouvent des usages en assurance qualité ou en maintenance sur ou hors site [Runji et al. 2022]. Les gains annoncés sont prometteurs et justifient vraisemblablement l'engouement actuel pour ces technologies. Sur la base des tests menés chez un leader du marché pharmaceutique³, la RA permettrait de réduire d'au moins 50 %, le temps de formation et d'améliorer la productivité, réduire les coûts et permettre d'économiser 27 millions de dollars par usine !

Cette aide à la formation et à l'acquisition d'autonomie ou de flexibilité chez les opérateurs semble permettre un travail plus confortable, essence même du Lean [Rosin et al. 2020]. Pour cela, l'assistance prend des formes très variables. Lorsque que les opérateurs dépendent ou peuvent profiter d'informations (en temps réel), la RA peut être utilisée pour afficher intuitivement

ces informations au plus près de l'utilisateur. Toutes ces avancées agissent également de façon positive sur la charge mentale comme le résumet Jeffri et Awang Rambli [2021] dans leur synthèse de 38 articles scientifiques. Plus du tiers des travaux ne révèle toutefois pas d'amélioration sur le taux d'erreur résiduel.

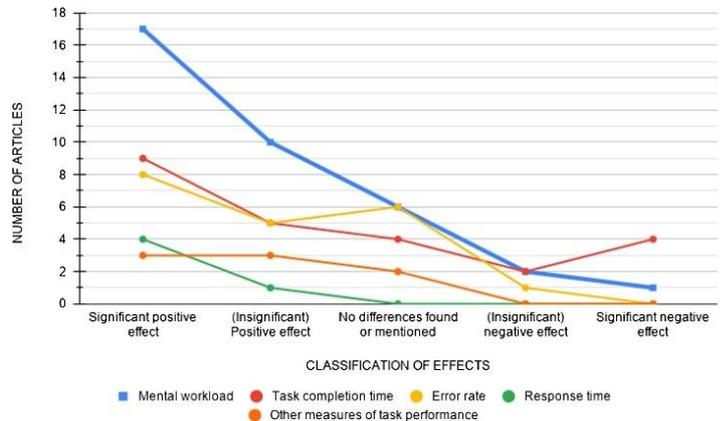


Figure 2. Effets de la RA sur la charge mentale et la performance durant une tâche (Jeffri et al [2021]).

2.3 Limites des expérimentations actuelles

Malgré l'intérêt de ces publications scientifiques, aucune étude d'ampleur n'a encore permis de caractériser **lors d'un même protocole expérimental et sur un échantillon représentatif à la fois la performance, l'engagement, la motivation, la charge cognitive, le stress et les émotions ressenties par un opérateur effectuant, en milieu industriel, des opérations de contrôle ou d'assemblage**. Quelques manques et limites subsistent, en effet, à la lecture de ces 33 cas d'études. La très grande majorité de ces dernières se contente d'un panel trop faible, ou de cas pratiques assez éloignés de l'industrie. Rodriguez et al. [2021] font par exemple appel à un panel de 90 participants, mais l'expérimentation consiste à assembler quelques briques Lego. Il en va de même chez Hou and Wang [2013] dont l'étude, déjà assez ancienne, s'intéresse à l'apprentissage de gamme de montage de Lego et vise à détecter d'éventuelles différences Homme/Femme. Marino et al. [2021] ne valident l'engagement que par des questionnaires NASA TLX (NSU ou sur mesure pour d'autres⁴), et comme souvent, ne comparent des solutions qu'à travers la performance en sec/pièce ou des taux d'erreurs résiduelles. Moghaddam et al. [2021] annoncent que seul ce dernier indicateur serait notablement amélioré par la RA vs des instructions manuelles lors d'opérations d'assemblage. Malheureusement pour cette étude, seulement deux groupes de 10 personnes sont comparés.

Plus critique encore, Szajna and Kostrzewski [2022] proposent de leur côté, comme illustrée à la Figure 3, un protocole se proposant de comparer l'efficacité d'opérateurs assistés d'IA et de RA. Le protocole permettait une analyse en temps réel de la mesure effectuée et affichait un retour direct de conformité (ou non) de la pièce pour faciliter la prise de décision de l'opérateur. Ce dernier n'a toutefois été testé que par 6 opérateurs.

² <https://www.manufacturing.net/industry40/article/13250787/augmented-reality-and-the-smart-factory>

³ <https://www.ptc.com/fr/case-studies/leading-pharmaceutical-company-improves-productivity>

⁴ Wang et al. [2022] constatent d'ailleurs dans sa revue de littérature que la qualification de l'expérience utilisateur (les préférences, la facilité d'utilisation, la performance perçue, l'intuitivité, le réalisme, les ressentis utilisateurs, etc.) n'est très majoritairement obtenue que par le biais de questionnaires « normalisés » ou non

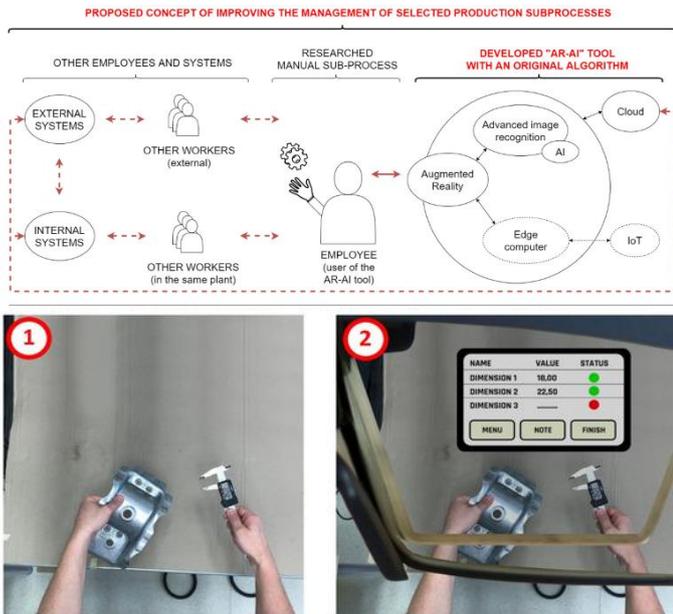


Figure 3. Protocole expérimental de l'étude de Szajna et Kostrzewski (2022)

L'exploitation et la généralisation des résultats s'avèrent alors critiquables. De plus, les analyses effectuées telles que celles proposées par [Danielsson et al. 2020] sont très/trop souvent orientées techniques ou technologique, et bien trop peu centrée sur l'humain. En cherchant à qualifier l'acceptabilité de ce type de technologie, Schuster et al. [2021] constatent à ce titre, via un panel de 28 expérimentateurs assemblant une petite voiture (jouet d'enfant), que l'outil de AR testé serait utile pour l'apprentissage, mais que les lunettes (Microsoft HoloLens) s'avèrent vite inconfortables pour l'utilisateur. Enfin, le monde éducatif ou de la formation est lui aussi à la pointe et impliqué dans diverses études visant à comprendre et à optimiser l'apprentissage, la rétention d'information ou l'immersion (même si ces questions intéressent également bien d'autres secteurs). Le contexte et le public visé dans des études telles que celles menées par Cabero-Almenara et al. [2022] s'éloignent toutefois trop de notre cible pour se risquer à transposer sans biais l'essentiel des conclusions au monde industriel.

Même si les technologies de RA existent depuis de nombreuses années maintenant et sont au centre de nombreuses études scientifiques et industrielles, des interrogations subsistent donc, selon nous, et méritent quelques investigations et études complémentaires. Les bénéfices en matière de vitesse d'exécution d'une tâche et d'assimilation des informations restent, en particulier, mitigés [Wuttke et al. 2022]. Pour être en mesure de déployer un protocole à même de répondre à nos questions de recherches, il convient à présent de nous interroger sur les modalités de RA les plus adaptées à nos besoins et qui nous seront utiles pour valider l'intérêt/engagement de l'opérateur dans sa tâche.

3 REALITES ET LIMITES DES TECHNOLOGIES DE RA DISPONIBLES

3.1 Analyse des Modalités de RA : projetée, casque ou tablette

Les modalités envisageables pour apporter de l'aide sur poste en RA s'avèrent de nos jours nombreuses. Mark et al. [2021] ont identifié jusqu'à 43 modalités dans leur revue de littérature portant sur 121 articles scientifiques (Figure 4).

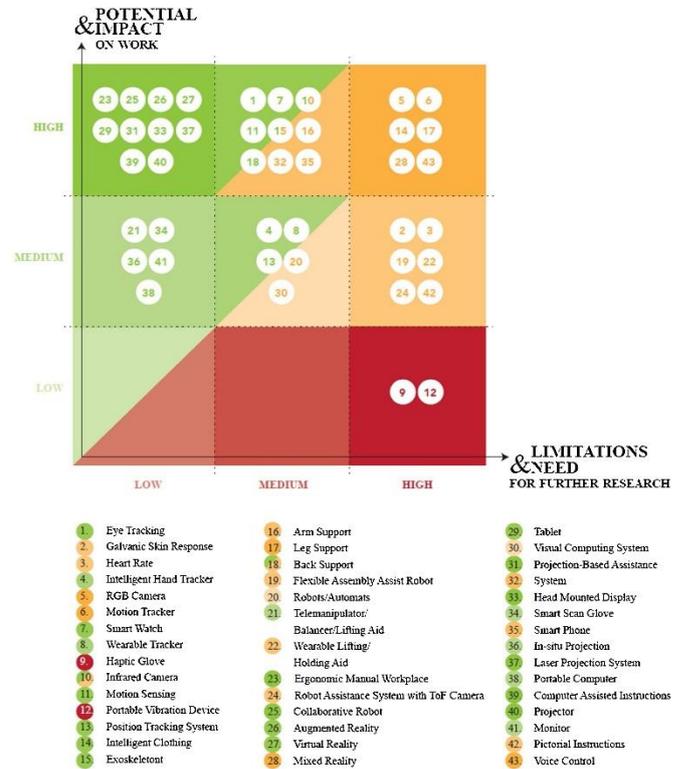


Figure 4. Les systèmes d'aide aux travailleurs : potentiel et limites selon Mark et al [2021]

Nous avons pour notre part identifié quelques guides méthodologiques et revues de la littérature permettant d'orienter nos choix. En dehors des dispositifs auditifs/tactiles/olfactifs non adaptés à notre cas/contexte industriel, nous retiendrons suite à cette revue 5 modalités envisageables apportant un retour visuel à l'utilisateur (Figure 5): (i) la RA sur écrans « déportés » et fixes (ii) par vidéo projection (iii) la RA sur écran portable (smartphones ou tablettes), (iv) les casques ou Head Mounted Display (HMD) à vision vidéo et enfin (v) les HMD à vision optique. Dans des contextes d'instructions pour l'assemblage manuel, de formation et de contrôle qualité, il s'avère que ces deux dernières modalités sont les plus étudiées ces dernières années avec respectivement 27,7% et 13,4% des études scientifiques, comme le résume la figure 5 [Wang et al. 2022].

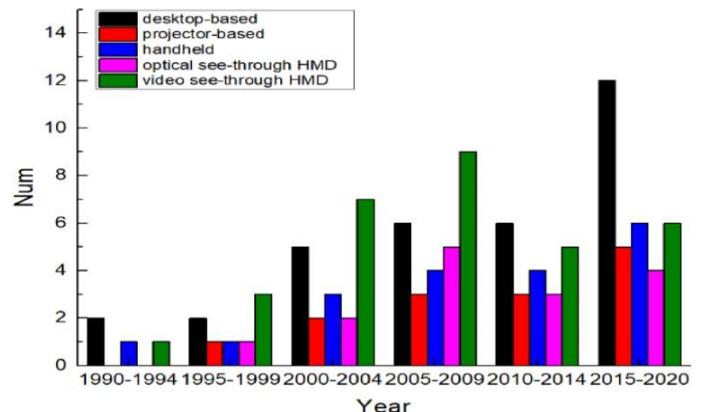


Figure 5 Modalités d'AR étudiées au fil des années selon Wang et al. (2022)

3.2 Périmètre technique retenu

Pour rendre notre application aussi confortable et exploitable que possible, il est nécessaire de répertorier les désagréments ou critiques généralement formulées prioritairement à l'encontre

des cinq technologies de RA précédemment citées, ainsi que les biais constatés lors des protocoles expérimentaux mis en place. La synthèse proposée par Havard [2018] souligne que pour un usage sur poste et pour des cycles répétés et journaliers, la solution de type RA projetée serait la plus adaptée.

Tableau 2. Comparatif des dispositifs permettant d'afficher des contenus en réalité augmentée selon Havard (2018)

Appareil Caractéristiques	Optical see- through OST	Optical Glance	Video see through VST	Tablette ou mobile	Ecran déporté	Projection portable	Projection fixe
Mobile	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Usage extérieur	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
Interactions	Limitées	Limitées	Limitées	Tactile	Tactile	Limitées	Limitées
Mains libres	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Opérateur équipé	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Non
Champ de vision	23 à 90°	15 à 30°	110°	20 à 50°	90 à 100°	Œil humain	Œil humain
Occlusion du monde réel	Oui	Limitée	Oui	Limitée	Non	Non	Non
Augmentation de forme quelconque	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non
Binoculaire	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Calibration nécessaire	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui
Fatigue visuelle	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non
Temps d'utilisation (alimentation)	Limité	Limité	Limité	Limité	Illimité	Limité	Illimité
Exemples d'appareils	Microsoft Hololens Meta 2 Epson Moverio BT- 300 Laster WAV3	Vuzix M-100 Vuzix M-300 ORA-2	Oculus Rift HTC Vive	Samsung Galaxy iPad	Caméra et écran tactile	Caméra et projecteur standard	Caméra et projecteur standard

Dans ce travail de recherche, l'auteur a constaté que les solutions optiques peuvent entraîner de nombreux désagréments : (i) erreur de calibrage, (ii) dérive du capteur de suivi oculaire portable, (iii) faible précision de coordination tête-œil, (iv) défaut de communications avec l'extérieur, (v) défaillance de l'alimentation électrique et/ou en données, (vi) fatigue... Au cours d'une étude portant sur le guidage lors d'intervention médicale, les auteurs valident le fait qu'à précision identique (< à 2mm), l'AR projetée a permis d'améliorer le confort visuel, en évitant le flou et la fatigue visuelle que l'on retrouve en portant des HMD [Mamone et al. 2021]. D'autres auteurs ont signalé de légers symptômes de nausée, de malaise et/ou de désorientation, probablement en raison de la résolution limitée des caméras HMD [Marques et al. 2020]. Il devient par conséquent nécessaire d'acquérir du matériel plus performant pouvant toutefois engendrer certains problèmes de latence. Comme le rappellent Masood and Egger [2020] dans leur étude, le poids des dispositifs montés sur la tête (HMD) et la réduction du champ de vision de ces dispositifs sont d'autres sujets de critique. Ils rendent fatigante d'un point de vue visuel l'utilisation sur une journée le système IAR (comme évoqué en partie 2), mais ils ont également un impact sur les performances et la concentration. En outre, la conception de l'interface utilisateur peut entraîner une distraction ou une désorientation. Par ailleurs, il convient de rappeler que l'assemblage/désassemblage est l'opération la plus courante pour laquelle la RA a été déployée jusqu'à présent [Baroroh et al. 2021]. Un processus d'assemblage manuel implique des opérations manuelles constantes et une prise de décision par les humains. Si elle est correctement conçue, l'application peut réduire la charge de travail mental d'un opérateur en affichant des conseils de procédure ou des instructions « au standard » pendant le processus. Elle permet également de prévenir les

erreurs humaines en apportant une connaissance contextualisée ou en préconisant des actions sécurisées. Cependant, ces mêmes auteurs rappellent que la reconnaissance et le positionnement manuels des objets peuvent exiger une attention et une conscience élevées de la part des opérateurs. La charge mentale induite par une concentration constante lors de la visualisation instantanée/superposée de mesures dimensionnelles ou d'informations supplémentaires dans l'environnement de travail peut être excessive. L'aptitude à détecter des signaux varie en fonction de la capacité, de la sensibilité et de la personnalité de l'individu, et il en va de même pour la performance résultante dans des conditions de bruit élevé ou de faible luminosité. Wang et al. [2022] confirment ces désagréments en soulignant que lors des expérimentations mises en place, des instructions dynamiques complexes tendent à distraire les utilisateurs lorsque les instructions de RA sont trop complexes. *Pour comprendre « l'intention » de l'opération, le cerveau de l'utilisateur doit dépenser beaucoup d'énergie pour l'analyser, ce qui nuit à ses capacités cognitives.* La RA intégrant la reconnaissance et le positionnement automatiques est une méthode courante pour résoudre ce problème en augmentant la conscience du contexte de l'homme en temps réel avec une charge de travail mental réduite. Nous veillerons donc à intégrer ce type de fonctionnalités et des instructions « simples » à notre dispositif. Le tracking des pièces se fera à l'aide d'étiquettes types QRCode pour un maximum de robustesse.

Ces derniers éléments et l'ensemble de notre travail d'analyse justifient ainsi la solution développée, les affichages proposés ainsi que le protocole expérimental imaginé. Ces éléments sont présentés plus longuement en partie 4.

4 DISPOSITIFS ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

4.1 Application développée

Pour toutes les raisons énoncées précédemment, nous nous sommes donc attachés à développer une application de RA projetée sur poste ne restreignant pas l'opérateur dans ses aptitudes à communiquer avec son entourage. Nous conserverons ainsi une très grande liberté d'action, et réduirons ainsi au maximum les temps d'adaptation, les risques d'acceptabilité, les phénomènes de latence ou de faible autonomie électrique. Enfin, cette modalité nous permet de conserver les mains libres et un champ de vision maximal pour l'opérateur lors des activités de contrôle et d'assemblage étudiées. Dans son étude, Wang et al. [2022] révèlent que 75% environ des études portant sur les instructions transmises par la RA sont validées via des protocoles « purement expérimentaux en laboratoire » contre seulement 25% d'études portant sur des besoins et des expériences en milieux « industriels ». Ces instructions sont majoritairement statiques et occasionnellement dynamiques (35% des études publiées). Cela montre que la recherche le guidage par instruction Dynamique en RA est encore très peu mature et mérite que l'on s'y intéresse plus longuement. Nous nous sommes de ce fait efforcés de mettre au point un affichage « dynamique » **projeté à même la table de travail**, qui « suivra » le produit industriel et dont l'information sera adaptée au produit et à l'erreur constatée sur le poste. La référence du produit contrôlé ainsi que les différentes erreurs décelées seront énoncées par texte, un visuel 3D de la pièce défectueuse sera affiché au plus près du produit, et quelques zones et changements de couleurs seront apportés pour distinguer plus facilement la zone à inspecter (multiples choix en tests actuellement pour maximiser la compréhension). Ces

activités de contrôle et d'assemblage se feront sur de véritables produits industriels (Raquettes TSL, voir figure 6) dans un environnement de travail conforme à celui de notre partenaire. Nous réfléchissons enfin, pour quelques expérimentations ciblées, à tester l'apport d'un affichage, en temps réel, d'indicateur de concentration ou « d'alerte » ponctuelle relatant une baisse d'attention, du taux de qualité ou de l'engagement de l'opérateur (à l'image des « Alertes d'assouplissements » ou autre ADAS (« Advanced Driver Assistance Systems ») pour la conduite automobile). L'aperçu d'un des rendus possibles est proposé à travers la figure 6.

Toutes ces précautions nous permettront de limiter les biais expérimentaux lors des projets à suivre et présentés en partie 3. Les fichiers 3D fournis par notre partenaire industriel⁵ et l'expertise de la branche valorisation⁶ d'Arts et Métiers ont par ailleurs rendu possible l'intégration de l'application de réalité augmentée sans alourdir le protocole expérimental. Enfin, comme dans de nombreuses études, la dernière critique à laquelle nous pourrions être confrontés est le fait que notre protocole sera, au moins dans un premier temps, validé et testé par un public universitaire. Il nous paraît toutefois utile de signaler que, comme nos étudiants lors des tests, l'entreprise TSL assemblant de façon industrielle le produit ([raquette 325](#)) qui nous servira de cas d'étude, fonctionne, elle aussi, avec peu d'experts sur ses lignes (80% d'intérimaires en période de forte charge). Par ailleurs, même si des projets sont à l'étude au sein de cette société pour tester le guidage par RA, ces développements sont sous-traités, et aucun cadre ne maîtrise actuellement cette technologie. Nos expérimentations devraient donc permettre de rendre compte de résultats proches de résultats industriels.



Figure 6. Produit TSL et rendu possible de l'application.

4.2 Méthodologie générale

La grande majorité des précédentes recherches qui se sont donc intéressées à l'impact des technologies de l'I4.0 se sont concentrées uniquement sur la performance ou uniquement sur les comportements humains. Pour compléter les données présentes dans la littérature, l'étude dont il est question ici tentera donc de combiner des données quantitatives et qualitatives pour respecter une partie de l'agenda de recherche

proposé par [Liao et al. 2017]. Elle est donc construite sur une expérience dans une usine d'apprentissage, constituée de lignes d'assemblage de raquettes à neige avec un public étudiant pour réduire les biais liés aux expériences des professionnels. L'expérience sera construite sur un environnement d'assemblage existant, très similaire à la chaîne de montage de raquettes à neige de notre partenaire, tout en intégrant de nouvelles technologies et des instruments numériques pour mesurer les performances industrielles et humaines. Ces investissements s'intègrent par ailleurs dans un programme d'envergure mené aux Arts et Métiers et visant la création, sur chacun de ses sites universitaires, d'une ELF⁷ (Evolving Learning Factory). Des observations directes sur les comportements des opérateurs permettront d'analyser l'influence des changements de pratiques. Des enquêtes supplémentaires permettront de recueillir des données sur leur perception du travail effectué. Le laboratoire d'observation comprend des outils non invasifs afin de réduire les influences indésirables sur le comportement (observations biaisées). Au cours de l'essai préliminaire, les équipements de mesure suivants seront testés : Tobii Pro Glasses, The Observer (Noldus), veste Hexoskin (Carré Technologies). Les lunettes oculométriques (Tobii Pro) très légères et peu invasives ont été choisies parce qu'elles permettent d'étudier comment les collaborateurs interagissent avec leur environnement, ce qui attire leur attention et ce qui influence leur prise de décision [Zheng et al. 2022]. Cette technologie enregistre les données relatives au regard, aux saccades et à la fixation des travailleurs, et permet ainsi de mieux comprendre le processus de réflexion. Pour l'étude de cas, les saccades représenteront un indicateur de la recherche visuelle (niveau de stress) et la fixation d'un indicateur du traitement cognitif (niveau de concentration). Les vestes physiologiques (Hexoskin) ont été choisies pour collecter d'autres données physiologiques, telles que les mouvements, les battements de cœur et les rythmes respiratoires, données associées à la performance humaine, au stress et à l'engagement dans la tâche.

4.3 Expérimentation projetée et tâches correspondantes

Les modalités et les possibilités étant extrêmement nombreuses grâce aux outils en notre possession, nous proposons de présenter ici la version de l'étude qui était envisagée en mars 2023. Celle-ci devrait sensiblement évoluer d'ici juin et sa mise en place : Les participants seront principalement les élèves ingénieur du cursus d'Arts et Métiers du campus de Cluny, en France. Aucun participant ne sera préalablement familier de la tâche choisie pour cette expérience. Ce protocole sera examiné et approuvé par le comité d'éthique de la recherche de Polytechnique Montréal (Canada). Cette étude se fait dans le prolongement de l'expérimentation réalisée par Passalacqua et ses collègues (2023)⁸.

Les participants se verront confier les tâches d'un opérateur sur une chaîne de montage de raquettes à neige. Leur objectif sera

⁵ <https://www.tsloutdoor.fr/>

⁶ <https://www.ic-arts.eu>

⁷ <https://artsetmetiers.fr/fr/actualites/le-campus-arts-et-metiers-daix-en-provence-inaugure-son-espace-de-mediation-scientifique>

⁸ Voir la vidéo suivante pour un aperçu de la configuration expérimentale : <https://youtu.be/xtcpqcyz8k>.

de détecter toute erreur éventuelle commise par les opérateurs précédents et de terminer l'assemblage de la raquette si aucune erreur n'est détectée. Les participants recevront des produits assemblés à 90%. 30 raquettes seront placées sur des chariots. Ce lot correspond à l'activité 1 (Task1) de la Figure 7.

Pour chaque raquette, le dispositif de RA scanner le QR code associé, et indiquera si le produit est conforme ou si une erreur est constatée. Après validation et/ou prise de décision, il pourra rejeter le produit ou assembler les 10% restants pour le remettre à sa place initiale. Des erreurs seront introduites artificiellement et systématiquement dans certaines raquettes par les chercheurs (cas de six raquettes sur trente). Chaque erreur sera unique et apparaîtra toujours au même moment chez tous les participants. Les participants seront bien évidemment informés que l'expérience consiste à évaluer leur capacité à détecter les erreurs de production dans les raquettes. L'activité 1 et l'activité 2 seront identiques en termes de nombre de contrôles à effectuer. Pour chacune de ces activités, 3 scénarios seront envisagés, et ce, de manière aléatoire : (i) aucune aide n'est apportée (appelée No RAI), (ii) une RA couplée à de l'IA complètement automatisée est proposée (Full automation RAI → toutes les erreurs sont détectées), (iii) une RA couplée à de l'IA partiellement automatisée est enfin proposée (Partial automation RAI → 80% seulement des erreurs sont détectées). Pour plus de précisions, se reporter à l'article de Passalacqua et al. (2023) qui détaille ce même protocole en remplaçant la RAI par une simple IA instruite sur écran déporté.

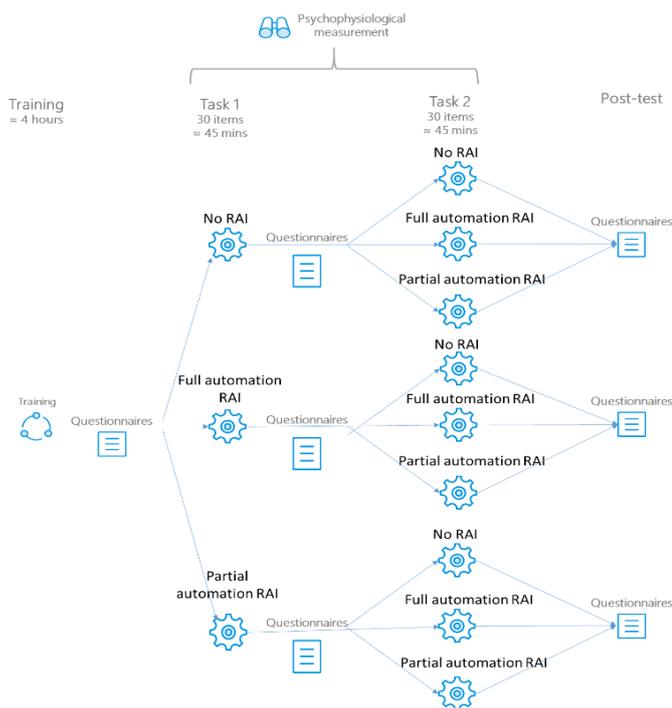


Figure 7. Les 9 scénarii du plan expérimental complet

Nous pourrions ainsi chercher à déceler l'effet de la RA sur les performances et sur le comportement de l'opérateur, mais aussi constater les effets des améliorations ou des dégradations de l'aide digitale apportée aux opérateurs.

4.4 Variables et moyens de mesure

Pour caractériser l'état émotionnel des opérateurs, et pour compléter les variables mesurées dans le cadre de

l'expérimentation menée par Passalacqua et al. (2023), il a été décidé de rajouter l'utilisation d'un outil oculométrique de type Tobii Pro glasses 2. Les lunettes Tobii sont celles qui sont le plus utilisées dans le cadre d'expérimentation et les plus précises [Joseph MacInnes et al. 2018; Zheng et al. 2022].

Les lunettes oculométriques permettent l'enregistrement et l'analyse des mouvements oculaires d'une personne. Cette méthode est appliquée dans divers domaines de recherche médicale, psychologique et linguistique, ainsi que dans le marketing et l'interaction homme-machine [Duchowski 2002]. L'analyse des mouvements oculaires pendant l'observation d'une personne ou pendant l'exécution de certaines tâches permet de tirer des conclusions sur les stratégies cognitives sous-jacentes [Holmqvist et al. 2011]. Dans le contexte de l'assemblage manuel, Stoessel et al. [2008] ont également présenté un système d'assistance qui utilise l'oculométrie pour analyser les processus cognitifs d'un utilisateur pendant l'exécution d'une tâche d'assemblage.

Les données ainsi obtenues sont considérées comme extrêmement utiles pour étudier l'interaction homme-système : les paramètres les plus fréquemment analysés sont l'Eye Gaze (EG) et la dilatation de la pupille (D), qui fournissent des informations sur la source d'attention et le stress d'un individu [Sharma and Gedeon 2012] ainsi que sur sa charge mentale [Martin et al. 2011]. Sur la base de l'analyse de la durée de fixation et de la dilatation de la pupille [Palinko et al. 2010], un indice d'activité cognitive (ICA) peut également être défini et la variabilité du regard peut permettre de détecter un niveau d'attention et des conditions de stress [Marquart et al. 2015]. Le taux de clignement peut également représenter un flux de données utile : Marquart et al. [2015] ont constaté que la durée des clignements des yeux décroît avec l'augmentation de la charge cognitive alors que la latence du clignement augmente avec la charge cognitive associée à la tâche réalisée.

D'un point de vue technologique, les lunettes oculométriques présentent également plusieurs avantages : la caméra enregistre le point de vue de l'utilisateur et peut être utilisée sur des environnements réels et virtuels. De plus, en l'associant avec d'autres outils comme les vestes physiologiques, il est possible d'enregistrer directement les comportements humains et les données physiologiques, tout en étant peu obstructif. Il devient ainsi envisageable de mesurer des paramètres utiles, tels que la fréquence cardiaque, et d'identifier ainsi le stress humain dans diverses conditions telles qu'une tâche cognitive, une charge de travail physique élevée ou la réalisation d'une action stressante [Mulder et al. 2004]. En outre, les vestes permettent de mesurer également le rythme respiratoire (BR), l'activité corporelle (BA) au moyen d'accéléromètres et de gyroscopes pour trianguler les mesures. La fréquence cardiaque et le rythme respiratoire permettent aussi d'inférer le niveau d'engagement dans la tâche [Gao et al. 2020]. Enfin, l'enregistrement vidéo permet d'ajouter et de capitaliser des informations riches d'enseignement comme les actions exécutées ou l'environnement de travail étudié.

Une autre possibilité liée à l'analyse des mouvements oculaires consiste à caractériser les zones dites d'intérêt (AOI), qui représentent les zones plus ou moins fixées/utilisées par l'opérateur dans son champ de vision. La séquence étudiée des différentes zones d'intérêt permet de tirer des conclusions concernant l'accès aux informations fournies dans ces zones [Goldberg and Kotval 1999]. Ainsi, pour l'évaluation des données de suivi oculaire, il sera possible d'identifier toutes les zones pertinentes du système d'assistance. Les mouvements oculaires des participants seront analysés manuellement afin de

recueillir la séquence d'observations des différents AOI pour chaque étape du processus d'assemblage ou de contrôle. Une fois les séquences enregistrées, une séquence « standard » pourrait être identifiée et définie pour chaque étape du processus d'assemblage. Cette séquence standard pourrait alors servir de référence et être comparée à la séquence d'un usager dans le but de déceler des écarts et les causes de ces écarts.

In Fine, le Tableau 3 résume l'ensemble des variables qu'il sera

possible de capter dans le cadre de l'expérimentation et leur opérationnalisation. Lorsque ce sera possible, nous utiliserons des mesures physiologiques couplée avec des mesure perceptuelles (auto-évaluation) pour obtenir une compréhension plus complète de l'état des participants [de Guinea et al. 2014][Passalacqua et al. 2020]. Pour plus de précisions, se reporter à l'article de Passalacqua et al. (2023).

Tableau 3. Variables mobilisées dans le cadre de l'expérimentation et leur opérationnalisation

Variable	Mesure	Type de mesure	Opérationnalisation	Référence
Besoins motivationnels	Échelle d'autonomisation psychologique	Auto-évaluation	Score de compétence et d'autonomie	[Spreitzer 1995]
Motivation	Échelle de motivation situationnelle	Auto-évaluation	Score intrinsèque, identifié, externe et d'amotivation	[Guay et al. 2000]
Engagement cognitif	Sous-échelle d'absorption de l'UWES	Auto-évaluation	Score d'absorption cognitive	[Schaufeli et al. 2003]
	Veste Hexoskin	Physiologique	Rapport de la basse et haute fréquence du rythme cardiaque	[Gao et al. 2020]
Engagement émotionnel (excitation)	Curseur affectif	Auto-évaluation	Score d'excitation émotionnelle	[Betella and Verschure 2016]
	Veste Hexoskin	Physiologique	Fréquence respiratoire de base	[Gao et al. 2020]
Engagement émotionnel (valence)	Curseur affectif	Auto-évaluation	Score de valence émotionnelle	[Betella and Verschure 2016]
Engagement comportemental	Sous-échelle de vigueur de l'UWES	Auto-évaluation	Score de vigueur	[Schaufeli et al. 2003]
	Veste Hexoskin (accéléromètre)	Physiologique	Écart-type de l'intensité de l'effort physique manifesté lors d'une tâche	[Gao et al. 2020]
Engagement dispositionnel	Échelle générale d'orientation de causalité	Auto-évaluation	Autonomie, contrôle et score impersonnel	[Deci and Ryan 1985]
Charge cognitive	Index de charge des tâches de la NASA	Auto-évaluation	Score de demande mentale	[Hart and Staveland 1988]
	Enregistrement vidéo (eye-tracking)	Physiologique	Entropie du regard et dilatation de la pupille	[Doellken et al. 2021];[Martin et al. 2011]
Stress	Échelle de la perception du Stress	Auto-évaluation	Score de perception de stress	[Levenstein et al. 1993]
	Veste Hexoskin	Physiologique	Basse et haute fréquence du rythme cardiaque	[Kim et al. 2018]
Temps d'exécution des tâches	Enregistrement vidéo (caméra)	Observation	Temps nécessaire pour terminer la tâche	-
	Enregistrement vidéo (eye-tracking)	Observation	Durée et nombre de fixations de l'AOI	[Ulutas et al. 2020]
Performances de détection des erreurs de tâche	Fichier de sortie Excel	Observation	Pourcentage d'exactitude	-

5 RESULTATS PRELIMINAIRES ET PERSPECTIVES

La mise en œuvre d'un tel cadre d'expérimentation est un processus lourd et complexe qui nécessite des compétences multiples et complémentaires. Cependant, cet outil de RA couplé à l'une de nos usine-école⁹ offrira bientôt la possibilité d'étudier les conditions de bon déploiement de l'I4.0 en évitant l'écueil d'une approche trop techno-centrée afin d'évaluer **comment l'IA couplée à la RA influent sur les performances, la motivation, l'engagement et la charge cognitive des travailleurs dans un contexte de production** en plus d'aborder **la conception et la mise en œuvre d'une technologie ou d'un ensemble de technologies 4.0 (en l'occurrence IA + RA dans cet article) de manière à obtenir des résultats positifs pour les employés.**

Une phase de prétest est prévue fin mars 2023 sur un échantillon d'étudiants d'école d'ingénieur pour une expérimentation effective du 1 au 21 juin. La mise en œuvre de cette étude a fait émerger un grand nombre d'interrogations au sein de notre équipe. Il serait par exemple intéressant de vérifier si les résultats (évolution comportementale et/ou en termes de productivité/autonomie/implication) de l'introduction d'une nouvelle technologie dans le travail de l'opérateur dépendent de la technologie introduite ? Si tel est le cas à la vue de nos résultats, il faudra introduire l'utilité perçue par l'opérateur pour expliquer la variation des résultats. Si les résultats sont

finalment indépendants, il se pourrait que des groupements de technologie d'assistance au travail soient à étudier en miroir du niveau d'assistance perçue par l'opérateur. D'autre part, le travail expérimental pourrait permettre de lever quelques doutes chez nos partenaires industriels en quantifiant les plus-values d'une IA couplée à la RA projetée vs une IA/RA déportée sur simple écran. Un des autres objectifs masqués de l'étude, en plus de mesurer l'impact de la IA/RA sur les performances, la motivation, l'engagement et la charge mentale, est de vérifier la validité des données récupérées par les lunettes oculométriques. En particulier sur la charge cognitive, si les données issues du questionnaire sont sensiblement similaires aux données oculométriques, cela nous permettrait lors de prochaines expérimentations de faire abstraction de l'utilisation des questionnaires pour rendre l'expérience la plus réelle et la moins chronophage possible.

Moyennant quelques aménagements, le protocole expérimental et la représentativité « industrielle » de nos usines-écoles permettront également de compléter des travaux récents portant sur l'évaluation et la rétroaction en temps réel de l'attention des opérateurs durant l'exécution de la tâche [Demazure et al. 2021] ou [Karran et al. 2019]. Nous espérons que cela sera rendu possible grâce à l'utilisation généralisée des lunettes oculométriques [Zheng et al. 2022].

Une dernière perspective de recherche serait enfin, de s'intéresser pendant l'expérimentation à l'interprétabilité des

⁹ <https://dyneo.eu/>

tâches à exécuter par l'opérateur. Il s'agirait d'explicitier puis de comprendre le raisonnement durant la tâche des participants. Il faudrait pour cela imaginer un « raisonnement type » qui justifierait les actions prises par l'opérateur et de vérifier la pertinence de ce raisonnement au travers d'un questionnaire. Étant donné que le protocole expérimental sera réalisé dans une usine-école, nous pourrions explicitier le raisonnement au travers du couplage des données issues de l'oculométrie, les vestes électrodermales et de caméras placées sur le poste de travail. Nous pourrions alors analyser les vidéos, les réactions et les données avec le participant. Lors de cette phase d'auto-confrontation, il semble envisageable de demander au participant d'explicitier ses actions et son raisonnement associé. Cela demandera d'inclure dans le protocole expérimental ce temps autoréflexif afin de tirer parti du retour de l'utilisateur sur ses actions et ses pensées.

6 REMERCIEMENTS

Nous aimerions remercier l'entreprise TSL pour son aide matériel ainsi que le Tech3lab, HEC et Polytechnique Montréal pour l'aide et le traitement à venir des données collectées. Ce travail a également bénéficié du soutien financier de l'Université Bourgogne Franche-Comté à travers le projet NCU RITM-BFC portant la référence ANR-17-NCUN-0003.

7 REFERENCES

- Baroroh, D. K., Chu, C.-H., and Wang, L. [2021] "Systematic literature review on augmented reality in smart manufacturing: Collaboration between human and computational intelligence," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 61, pp. 696–711.
- Betella, A., and Verschure, P. F. [2016] "The affective slider: A digital self-assessment scale for the measurement of human emotions," *PloS one*, Vol. 11, No.2, p. e0148037.
- Cabero-Almenara, J., Llorente-Cejudo, C., and Martinez-Roig, R. [2022] "The use of mixed, augmented and virtual reality in history of art teaching: A case study," *Applied System Innovation*, Vol. 5, No.3, p. 44.
- Danielsson, O., Holm, M., and Syberfeldt, A. [2020] "Augmented reality smart glasses in industrial assembly: Current status and future challenges," *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 20, p. 100175.
- Deci, E. L., and Ryan, R. M. [1985] "The general causality orientations scale: Self-determination in personality," *J. Res. Pers.*, Vol. 19, No.2, pp. 109–134.
- Demazure, T., Karran, A., Léger, P.-M., Labonté-LeMoyné, É., Sénécal, S., Fredette, M., and Babin, G. [2021] "Enhancing Sustained Attention," *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 63, No.6, pp. 653–668.
- Devagiri, J. S., Paheding, S., Niyaz, Q., Yang, X., and Smith, S. [2022] "Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges," *Expert Systems with Applications*, Vol. 207, p. 118002.
- Doellken, M., Zapata, J., Thomas, N., and Matthiesen, S. [2021] "Implementing innovative gaze analytic methods in design for manufacturing: A study on eye movements in exploiting design guidelines," *Procedia CIRP*, Vol. 100, pp. 415–420.
- Duchowski, A. T. [2002] "A breadth-first survey of eye-tracking applications," *Behavior Research Methods Instruments and Computers*, Vol. 34, No.4, pp. 455–470.
- Gao, N., Shao, W., Rahaman, M. S., and Salim, F. D. [2020] "n-gage: Predicting in-class emotional, behavioural and cognitive engagement in the wild," *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 4, No.3, pp. 1–26.
- Goldberg, J. H., and Kotval, X. P. [1999] "Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs," *Int. J. Ind. Ergon.*, Vol. 24, No.6, pp. 631–645.
- Guay, F., Vallerand, R. J., and Blanchard, C. [2000] "On the assessment of situational intrinsic and extrinsic motivation: The Situational Motivation Scale (SIMS)," *Motivation and emotion*, Vol. 24, pp. 175–213.
- de Guinea, A. O., Titah, R., and Léger, P.-M. [2014] "Explicit and implicit antecedents of users' behavioral beliefs in information systems: A neuropsychological investigation," *J Manag Inf Syst* Vol. 30, No.4, pp. 179–210.
- Hart, S. G., and Staveland, L. E. [1988] "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research," *Advances in psychology*, Elsevier, pp. 139–183.
- Havard, V. [2018] "Développement de méthodes et outils basés sur la réalité augmentée et virtuelle pour l'assistance ou l'apprentissage d'opérations dans un contexte industriel."
- Holmqvist, K., Nyström, M., Andersson, R., Dewhurst, R., Jarodzka, H., and Van de Weijer, J. [2011] *Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures*, OUP Oxford.
- Hou, L., and Wang, X. [2013] "A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks: A focus on differences in gender," *Automation in Construction*, Vol. 32, pp. 38–45.
- Jeffri, N. F. S., and Awang Rambli, D. R. [2021] "A review of augmented reality systems and their effects on mental workload and task performance," *Heliyon*, Vol. 7, No.3, p. e06277.
- Joseph MacInnes, W., Hunt, A. R., Clarke, A. D. F., and Dodd, M. D. [2018] "A Generative Model of Cognitive State from Task and Eye Movements," *Cognitive Computation*, Vol. 10, No.5, pp. 703–717.
- Kagermann, H., and Wahlster, W. [2022] "Ten Years of Industrie 4.0," *Sci, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, Vol. 4, No.3, p. 26.
- Karran, A. J., Demazure, T., Leger, P.-M., Labonté-LeMoyné, E., Sénécal, S., Fredette, M., and Babin, G. [2019] "Toward a hybrid passive bci for the modulation of sustained attention using EEG and fNIRS," *Front. Hum. Neurosci.*, Vol. 13, p. 393.
- Kim, H.-G., Cheon, E.-J., Bai, D.-S., Lee, Y. H., and Koo, B.-H. [2018] "Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature," *Psychiatry investigation*, Vol. 15, No.3, p. 235.
- Levenstein, S., Prantera, C., Varvo, V., Scribano, M. L., Berto, E., Luzzi, C., and Andreoli, A. [1993] "Development of the Perceived Stress Questionnaire: a new tool for psychosomatic research," *Journal of psychosomatic research*, Vol. 37, No.1, pp. 19–32.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., and Ramos, L. F. P. [2017] "Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 55, No.12, pp. 3609–3629.
- Mamone, V., Cutolo, F., Condino, S., and Ferrari, V. [2021] "Projected augmented reality to guide manual precision tasks: An alternative to head mounted displays," *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.*, Vol. 52, No.4, pp. 567–577.

- Marino, E., Barbieri, L., Colacino, B., Fleri, A. K., and Bruno, F. [2021] "An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments," *Computers in Industry*, Vol. 127, p. 103412.
- Mark, B. G., Rauch, E., and Matt, D. T. [2021] "Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 59, pp. 228–250.
- Marquart, G., Cabrall, C., and de Winter, J. [2015] "Review of Eye-related Measures of Drivers' Mental Workload," *Procedia Manufacturing*, 6th Inter. Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2015) and the Affiliated Conferences, AHFE 2015, Vol. 3, pp. 2854–2861.
- Marques, B., Alves, J., Neves, M., Justo, I., Santos, A., Rainho, R., Maio, R., Costa, D., Ferreira, C., and Dias, P. [2020] "Interaction with virtual content using augmented reality: a user study in assembly procedures," *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 4, pp. 1–17.
- Martin, C., Cegarra, J., and Averty, P. [2011] "Analysis of Mental Workload during En-route Air Traffic Control Task Execution Based on Eye-Tracking Technique," *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, Lecture Notes in Computer Science, D. Harris, ed., Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 592–597.
- Masood, T., and Egger, J. [2020] "Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation," *Computers in Industry*, Vol. 115, p. 103112.
- Moghaddam, M., Wilson, N. C., Modestino, A. S., Jona, K., and Marsella, S. C. [2021] "Exploring augmented reality for worker assistance versus training," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 50, p. 101410.
- Mulder, L. B. J., de Waard, D., and Brookhuis, K. A. [2004] "Estimating mental effort using heart rate and heart rate variability," *Handbook of human factors and ergonomics methods*, CRC Press, pp. 227–236.
- Palinko, O., Kun, A. L., Shyrovkov, A., and Heeman, P. [2010] "Estimating cognitive load using remote eye tracking in a driving simulator," *Proceedings of the 2010 symposium on eye-tracking research & applications*, pp. 141–144.
- Passalacqua, M., Léger, P.-M., Nacke, L. E., Fredette, M., Labonté-Lemoyne, É., Lin, X., Caprioli, T., and Sénécal, S. [2020] "Playing in the backstore: interface gamification increases warehousing workforce engagement," *Industrial Mgmt & Data Systems*, Vol. 120, No.7, pp. 1309–1330.
- Passalacqua, M., Pellerin, R., Doyon-Poulin, P., Del-Aguila, L., Boasen, J., and Léger, P.-M. [2022] "Human-Centred AI in the Age of Industry 5.0: A Systematic Review Protocol," *HCI Inter. 2022 – Late Breaking Papers: Interacting with eXtended Reality and Artificial Intelligence*, 4th International Conference on Human-Computer Interaction, HCII 2022, eds., Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 483–492.
- Passalacqua, M., Pellerin, R., Yahia, E., Magnani, F., Rosin, F., Joblot, L., and Léger, P.-M. [2023] "Human-Centred AI in Manufacturing: Exploring the Effect of Automation during Training on Worker Motivation, Engagement, and Return-to-Manual Performance."
- Rodriguez, F. S., Saleem, K., Spilski, J., and Lachmann, T. [2021] "Performance differences between instructions on paper vs digital glasses for a simple assembly task," *Applied Ergonomics*, Vol. 94, p. 103423.
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., and Pellerin, R. [2020] "Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 58, No.6, pp. 1644–1661.
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., and Pellerin, R. [2022] "Enhancing the Decision-Making Process through Industry 4.0 Technologies," *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 14, No.1, p. 461.
- Runji, J. M., Lee, Y.-J., and Chu, C.-H. [2022] "Systematic Literature Review on Augmented Reality-Based Maintenance Applications in Manufacturing Centered on Operator Needs," *Inter. Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, pp. 1–19.
- Sahu, C. K., Young, C., and Rai, R. [2020] "Artificial intelligence (AI) in augmented reality (AR)-assisted manufacturing applications: a review," *Inter. Journal of Production Research*, Vol. 59, pp. 1–57.
- Schaufeli, W. B., Bakker, A. B., and Salanova, M. [2003] "Utrecht work engagement scale-9," *Educational and Psychological Measurement*.
- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., and Ten Hompel, M. [2020] *Industrie 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies*, Acatech-National Academy of Science and Engineering.
- Schuster, F., Engelmann, B., Sponholz, U., Schmitt, J., and Engineering, I. D. [2021] "Human acceptance evaluation of AR-assisted assembly scenarios," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 61, pp. 660–672.
- Sharma, A., Mehtab, R., Mohan, S., and Mohd Shah, M. K. [2021] "Augmented reality – an important aspect of Industry 4.0," *Industrial Robot: the inter. journal of robotics research and application*, Vol. 49, No.3, pp. 428–441.
- Sharma, N., and Gedeon, T. [2012] "Objective measures, sensors and computational techniques for stress recognition and classification: a survey," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 108, No.3, pp. 1287–1301.
- Spreitzer, G. M. [1995] "Psychological empowerment in the workplace: Dimensions, measurement, and validation," *Academy of Mgmt Journal*, Vol. 38, No.5, pp. 1442–1465.
- Stoessel, C., Wiesbeck, M., Stork, S., Zaeh, M. F., and Schuboe, A. [2008] "Towards optimal worker assistance: investigating cognitive processes in manual assembly," *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: The 41 st CIRP Conference on Manufacturing Systems May 2008, Tokyo, Japan*, Springer, pp. 245–250.
- Szajna, A., and Kostrzewski, M. [2022] "AR-AI tools as a response to high employee turnover and shortages in manufacturing during regular, pandemic, and war times," *Sustainability*, Vol. 14, No.11, p. 6729.
- Ulutas, B. H., Özkan, N. F., and Michalski, R. [2020] "Application of hidden Markov models to eye tracking data analysis of visual quality inspection operations," *Cent. Eur. Oper. Res.*, Vol. 28, No.2, pp. 761–777.
- Wang, Z., Bai, X., Zhang, S., Billingham, M., He, W., Wang, P., Lan, W., Min, H., and Chen, Y. [2022] "A comprehensive review of augmented reality-based instruction in manual assembly, training and repair," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 78, p. 102407.
- Wuttke, D., Upadhyay, A., Siemsen, E., and Wuttke-Linnemann, A. [2022] "Seeing the Bigger Picture? Ramping up Production with the Use of Augmented Reality," *Manuf. Serv. Oper. Manag.* Vol. 24, No.4, pp. 2349–2366.
- Zheng, T., Glock, C. H., and Grosse, E. H. [2022] "Opportunities for using eye tracking technology in manufacturing and logistics: Systematic literature review and research agenda," *Comput Ind Eng*, Vol. 171, p. 108444.