



HAL
open science

Développement d'un scénario de maintenance industriel, écologique et reproductible pour l'évaluation ergonomique des interfaces humain-machine et de la charge mentale

Marine Desvergnès, Nicolas Louveton, Cécile Scotto Di Cesare, Kathleen Belhassein, Margot Vulliez, Pierre Laguillaumie, Célestin Préault, Jean Pylouster, Jean-Pierre Gazeau, Ludovic Le Bigot

► To cite this version:

Marine Desvergnès, Nicolas Louveton, Cécile Scotto Di Cesare, Kathleen Belhassein, Margot Vulliez, et al.. Développement d'un scénario de maintenance industriel, écologique et reproductible pour l'évaluation ergonomique des interfaces humain-machine et de la charge mentale. ERGO'IA 2023 - "L'avenir de l'humain dans les systèmes sociotechniques du futur", Oct 2023, Biarritz, France. hal-04405063

HAL Id: hal-04405063

<https://hal.science/hal-04405063>

Submitted on 19 Jan 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Définition et test d'un scénario de maintenance industrielle, écologique et reproductible pour l'évaluation ergonomique des interfaces humain-machine et de la charge mentale

Définition et évaluation d'un scénario de maintenance

MARINE, DESVERGNES* ¹	KATHLEEN BELHASSEIN ² MARGOT VULLIEZ ³	JEAN PYLOUSTER ¹ JEAN-PIERRE GAZEAU ²
NICOLAS, LOUVETON ¹ CÉCILE SCOTTO DI CESARE ¹	PIERRE LAGUILLAUMIE ² CELESTIN PREAULT ²	LUDOVIC LE BIGOT ¹

¹Centre de recherche sur la Cognition et l'apprentissage, Université de Poitiers, France. {prenom.nom}@univ-poitiers.fr

²Institut PPrime, Université de Poitiers, France. {prenom.nom}@univ-poitiers.fr

³Inria, Université de Bordeaux, France. {prenom.nom}@inria.fr

Abstract. L'objectif de cette étude était de concevoir un scénario qui propose un cadre écologique et reproductible pour l'évaluation de la charge mentale dans le cadre de l'utilisation d'interface humain-machine en contexte industriel. Afin de répondre à cet objectif, les variations de la charge mentale ont été évaluées lors de la réalisation d'une tâche de maintenance. Les résultats permettent d'observer des variations de charge mentale et des différences de stratégie et de performance chez les opérateurs. L'intérêt principal de ce scénario est de pouvoir observer ces variations au cours des sous-tâches et pas uniquement de façon globale sur l'ensemble de la tâche. Les études futures utilisant ce scénario pourront donc tester différents types d'interfaces et leurs effets sur la charge mentale et la performance des opérateurs.

CCS CONCEPTS • Human-centered computing • Interaction design • Interaction design process and methods

Additional Keywords and Phrases: Charge mentale, Design expérimental, Industrie 4.0, Interfaces d'interaction

Copyright:

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the Owner/Author. Copyright is held by the owner/author. ERGO'IA 2023, October 10--13, 2023, Bidart, France.

ISBN: 979-8-4007-0910-4

1 INTRODUCTION

Le monde industriel est en très forte évolution avec la mise en œuvre des principes de l'Industrie 4.0, basés sur l'adoption des dernières avancées des technologies de l'information. En particulier, Rüßmann [2015] constate l'intégration de technologies immersives, connectées et collaboratives au sein des systèmes de production qui peuvent avoir plusieurs buts comme faciliter les apprentissages, intervenir à distance ou augmenter les informations disponibles pour les utilisateurs. Il s'agit donc de fournir des augmentations cognitives aux individus, c'est-à-dire d'après Cinel et al. [2019] des éléments visant « l'amélioration des processus d'acquisition/génération de connaissances et de compréhension du monde qui nous entoure » (p. 2), pour améliorer leur performance.

L'ergonomie de ces augmentations cognitives est un enjeu clé pour favoriser l'appropriation, l'efficacité et la confiance des opérateurs dans le fonctionnement des nouvelles technologies à leur disposition [3]. La conception centrée utilisateur est une méthodologie itérative dont l'intérêt est de se baser sur les retours des utilisateurs au cours du processus de conception afin de concevoir des interfaces utilisables [4]. Cependant son adoption est principalement liée à l'essor de la fabrication de produits grand public [5, 6]. Pourtant, celle-ci permet aussi de s'assurer que les nouveaux systèmes de production du domaine industriel sont adaptés aux besoins réels des opérateurs et qu'ils impactent positivement les différentes dimensions cognitives mobilisées [7, 8]. En effet, l'intégration de nouvelles technologies, tel que des dispositifs d'interactions humain-robot qui sont de plus en plus présents au sein des systèmes de production, les rend plus complexes et a donc un effet sur les caractéristiques ergonomiques et cognitives des situations de travail [9]. Un facteur essentiel dans la régulation d'une tâche complexe et soumise à de fortes contraintes temporelles est la charge mentale de l'opérateur.

Cette dernière est complexe à définir et à mesurer car elle est multidimensionnelle et dynamique [10]. Selon Longo et al. [2022], « la charge mentale représente le degré d'activation d'un ensemble fini de ressources, limité en capacité, lors du

traitement cognitif d'une tâche primaire dans le temps, sous l'influence de facteurs environnementaux et situationnels dynamiques externes, ainsi que des caractéristiques internes statiques définies d'un opérateur humain, pour faire face aux exigences statiques de la tâche, en y consacrant des efforts et de l'attention » (p. 18).

Ainsi, d'un point de vue macroscopique ou global, le niveau de charge mentale fluctue en fonction de la variation des exigences de la tâche et des contraintes environnementales au cours du temps. D'un point de vue cognitif, le niveau de charge mentale change en fonction de l'efficacité de processus de traitement de l'information qui dépend elle-même des caractéristiques de l'opérateur (expertise, capacités attentionnelles, capacités mémorielles, etc.). L'aspect multidimensionnel, à prendre en compte pour une analyse complète de la charge mentale, concerne donc les caractéristiques de la tâche, de l'environnement et de l'opérateur. Or, si beaucoup d'études reflètent un aspect global de la charge mentale, son aspect dynamique au cours de la réalisation de la tâche est peu étudié au profit d'une valeur moyenne [12]. De plus, de nombreuses études consacrées à son évaluation ont été publiées dans la littérature scientifique mettant en avant différents types de mesures, de scénarios ou de technologies [13, 14, 15, 16]. Ces études apportent des résultats difficiles à comparer du fait de la diversité des tâches étudiées. Pour progresser au-delà des situations particulières, il est nécessaire de rapprocher de scénarios plus standardisés, permettant la comparaison des nouvelles interfaces d'interaction.

De plus, les principes de l'industrie 4.0 suggèrent d'utiliser de nouvelles technologies telles que la réalité virtuelle et mixte ou les robots, qui deviennent de plus en plus collaboratifs et partagent les tâches avec l'opérateur. Ces technologies immersives, augmentent la perception et la cognition de l'opérateur en lui fournissant des informations contextuelles lors de la réalisation d'une tâche sous la forme d'un affichage tête-haute [17]. Or, la possibilité de fournir plusieurs niveaux et modalités d'informations (retours haptiques, interfaces visuelles sous forme de flèches, textes, surbrillances, etc.) favoriserait la réduction de la charge mentale [18]. Il est donc primordial d'étudier ces dispositifs à l'aide de scénarios standardisés. Cependant, avant d'intégrer des interfaces, il est nécessaire de s'assurer que la tâche est réalisable en situation réelle et que la charge mentale varie dans ce contexte.

Deux défis méthodologiques sont donc à relever. Le premier défi consiste à définir une tâche industrielle dont le scénario serait à la fois suffisamment générique et écologique pour fournir des résultats généralisables à tous cas d'usage de maintenance industrielle. Autrement dit, le scénario doit se baser sur des tâches réalistes mais qui ne correspondent pas à un cas d'usage spécifique. Le second défi est de réaliser une analyse fine des variations de la charge mentale au cours de la tâche qui permettra aussi d'étudier l'impact des interfaces contextuelles visant à augmenter les capacités cognitives des opérateurs. Le scénario doit permettre l'observation des variations du niveau de charge mentale, sur une ou plusieurs dimensions, au cours de la réalisation des différentes étapes de la tâche et non pas uniquement de manière globale.

Aussi, notre contribution est de proposer un scénario représentatif d'un cas d'usage de maintenance industrielle pour l'évaluation ergonomique de telles technologies a posteriori. Dans cet article, nous développons un scénario de maintenance pour lequel nous avons réalisé une analyse cognitive de la tâche, permettant à la fois de formaliser notre scénario au niveau de chaque sous-tâche et de faire une hypothèse sur le niveau de charge mentale associée. Ce scénario pourra ensuite être utilisé pour évaluer de façon générique de nouvelles interfaces sur une base d'analyse ergonomique commune.

2 METHODE

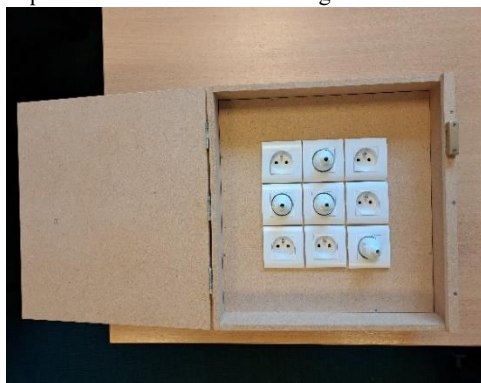
2.1 Scénario de maintenance

Un scénario de maintenance technique dans un contexte industriel a été construit. La maintenance est définie comme « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destiné à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Les actions de maintenance techniques incluent l'observation et les analyses de l'état du bien (par exemple inspection, surveillance, essai, diagnostic, pronostic, etc.) et des tâches de maintenance active (par exemple, réparation, remise en état). » [19]. L'aspect écologique de notre tâche réside dans son réalisme. Le but est de générer de l'engagement de la part des participants, contrairement à une tâche expérimentale qui n'a pas vocation à avoir un intérêt spécifique pour eux. Cette tâche consiste à vérifier l'état d'usure ou d'endommagement de divers éléments d'une armoire électrique fictive et à prendre des décisions en conséquence pour remplacer les composants avant qu'une défaillance n'apparaisse. En effet, les scénarios de maintenance sont très présents dans l'industrie et ont souvent fait l'objet d'études en réalité virtuelle et augmentée, où l'utilisation de telles interfaces contextuelles est particulièrement appropriée [20, 21]. Le scénario que nous développons doit à la fois être suffisamment écologique, c'est-à-dire être crédible aux yeux des participants, pour que les résultats puissent être généralisés à des situations industrielles concrètes et en même temps suffisamment générique pour être indépendant d'un contexte particulier. L'armoire à inspecter contient une matrice de

9 prises femelles, dans quatre d'entre elles, des prises mâles sont branchées. Lors de la première sous-tâche, les participants ouvrent la porte de l'armoire. Ils doivent ensuite débrancher les prises présentes dans l'armoire pour en vérifier le taux d'usure. Ce taux d'usure est indiqué sous la prise avec une pastille de couleur (verte, orange et rouge). Ces deux étapes correspondent à la deuxième sous-tâche. La couleur de la pastille renvoie à une consigne indiquant la règle de remplacement à appliquer (figure 1). Lors de la troisième sous-tâche, les participants doivent décider quelle est la règle à appliquer. Pour finir, après avoir vérifié toutes les prises, ils referment l'armoire et effectuent ainsi la quatrième sous-tâche.

2.2 Estimation préliminaire de la charge mentale

Afin d'estimer le niveau de charge mentale d'un tel scénario, la technique d'analyse cognitive de la tâche avec classification de la charge mentale¹ (CTAWC) de Knisely et al. [2021] a été utilisée. La particularité de la CTAWC est que la variabilité des processus cognitifs et moteurs mobilisés au cours de la tâche est mise en avant. En effet, cette technique se base sur les taxonomies de Harrow [1972] et Bloom [1956] pour estimer le niveau de complexité cognitive et sensorimotrice des différents sous-objectifs rencontrés lors de la réalisation de la tâche. Ces taxonomies définissent chacune 6 niveaux de difficulté associés à une augmentation du niveau de charge mentale. Cette analyse nous a permis de formaliser l'ensemble des sous-tâches et leur hiérarchie, ainsi que d'estimer le niveau de charge mentale associée (annexe 1). Ainsi, la CTAWC permet d'identifier des sous-



Probabilité de défaillance	Actions
0 à 55%	Pas de remplacement
56 à 75%	Remplacement par une prise en acier
76 à 100%	Remplacement par une prise en titane

Figure 1 : Présentation du matériel expérimental, à gauche une armoire à vérifier et à droite les consignes (couleur des pastilles de la prise initiale à gauche et couleur des pastilles des prises de remplacement à droite).

tâches qui devraient solliciter davantage de ressources cognitives.

2.3 Test du scénario en situation réelle

La validité de notre scénario a été évaluée en l'implémentant sous une forme physique. Le but de cette expérimentation est de s'assurer que la tâche est réalisable en situation réelle et qu'il est possible de faire une analyse fine des variations de la charge mentale dans ce contexte. Pour cela, il faut s'assurer de créer des conditions pouvant générer ces variations sans faire varier les exigences de la tâche. Nous avons donc choisi de ne faire varier que le contexte environnemental en testant l'effet de la pression temporelle sur la réalisation de la tâche et sur le niveau de charge mentale des participants. En effet, le test de dispositif de support pour réaliser la tâche n'est pas prévu dans cette étude car le but est d'abord d'évaluer la pertinence du scénario conçu. Dans ce contexte, plusieurs hypothèses ont été posées :

1. H1 : La pression temporelle va augmenter le score de toutes les composantes de la charge mentale, sauf celle portant sur le niveau d'exigence physique.
2. H2 : Le niveau de charge mentale moyen sera plus élevé lors de la réalisation de la tâche sous pression temporelle.
3. H3 : La performance des individus réalisant la tâche sous pression temporelle sera dégradée.
4. H4 : Les stratégies mises en place pour réaliser la tâche seront moins efficaces sous pression temporelle.

2.3.1 Participants

Trente-deux étudiants en L1 de psychologie de l'Université de Poitiers ont participé à cette étude de manière volontaire et avec une gratification sous forme de crédit-cours. Les participants étaient informés que l'étude était menée en accord avec les principes éthiques de la déclaration d'Helsinki puis ils signaient un formulaire de consentement libre et éclairé. Ils étaient informés que l'étude respectait le règlement général sur la protection des données (RGPD) et qu'aucune donnée susceptible de les identifier n'était collectée. L'échantillon comprenait 28 femmes et 4 hommes âgés de 17 à 22 ans ($M = 18.5$ ans, $SD =$

¹Traduction du terme original « Cognitive task analysis and workload classification »

0.984). Avant d'être inclus à l'étude, les participants déclaraient ne pas être atteints de daltonisme et avoir une vision correcte ou corrigée. Enfin, ils étaient répartis aléatoirement dans les deux conditions expérimentales : avec pression temporelle (groupe pression P) ou sans pression temporelle (groupe neutre N). Chaque groupe comprenait donc seize participants dont deux hommes.

2.3.2 Procédure

Les participants devaient réaliser le scénario de maintenance en vérifiant l'état des prises dans une armoire. La pression temporelle était induite par les consignes qui incitaient les participants à réaliser la tâche le plus rapidement possible ainsi que par le son d'un chronomètre qui se déclenchait dès le début de la tâche et s'arrêtait une fois la tâche terminée. Une fois la tâche réalisée, les participants complétaient le questionnaire NASA-RTLX puis un questionnaire socio-démographique qui permettait de renseigner l'âge, le sexe, la main dominante, la langue maternelle et l'atteinte ou non de daltonisme.

2.3.3 Mesures

Le temps de réalisation de la tâche et des sous-tâches, le nombre de demandes d'aide, le nombre d'erreurs et le nombre d'échecs (tâche non accomplie) étaient les indicateurs de performances de la tâche. Pour chaque demande d'aide, le participant était renvoyé vers les consignes et il lui était indiqué qu'il devait faire du mieux possible en fonction de ce qu'il comprenait. Un échec était comptabilisé dès lors que plus de 50% des sous-tâches n'étaient pas réalisées. Le nombre de répétitions des sous-tâches et le temps d'exploration lors de la tâche étaient les indicateurs de la stratégie mise en place par les participants. Le questionnaire NASA-RTLX a été utilisé dans sa version française [25, 26, 27] pour mesurer la charge mentale de travail.

3 RESULTATS

Les conditions d'application des tests paramétriques n'étant pas toujours respectées, nous avons fait le choix de réaliser l'ensemble des analyses statistiques avec des tests non-paramétriques.

3.1 Effet de la pression temporelle sur la charge mentale

Les participants du groupe P ($M = 50.9$, $SD = 26.9$) rapportaient un score plus important que les participants du groupe N ($M = 24.1$, $SD = 22.2$) pour ce qui est de la dimension temporelle du NASA-RTLX. L'analyse révèle un effet significatif de la pression temporelle ($U = 54.5$, $p < .01$) pour l'hypothèse $P > N$. Concernant la dimension « évaluation de la performance », le score moyen du groupe P était plus élevé ($M = 52.5$, $SD = 28.9$) que celui du groupe N ($M = 35.3$, $SD = 31.8$) et cette différence était aussi significative ($U = 83.5$, $p = 0.048$) pour l'hypothèse $P > N$. Cependant, pour les dimensions liées à l'exigence mentale, l'exigence physique, l'effort global et la frustration, les scores des groupes P et N ne montraient pas différences significatives ($U = 92$, $p = 0.09$; $U = 112$, $p = 0.28$; $U = 119$, $p = 0.64$; $U = 118$, $p = 0.36$) pour l'hypothèse $P > N$. Pour les scores moyens du NASA-TLX, qui donnent une indication du niveau global de charge mentale rapporté par les participants, la différence de score entre les deux conditions était significative ($U = 79.5$, $p = 0.035$) pour l'hypothèse $P > N$. Les participants du groupe P rapportaient un score moyen plus élevé ($M = 42.7$, $SD = 13.1$) que ceux du groupe N ($M = 32.8$, $SD = 14.4$) (figure 2).

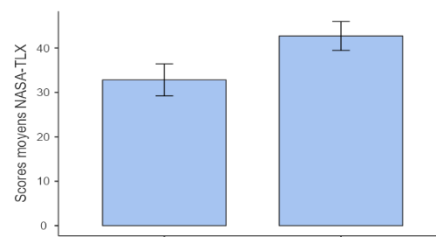


Figure 2 : Scores moyens et intervalle de confiance (95%) du NASA-RTLX

3.2 Effet de la pression temporelle sur la performance

3.2.1 Analyse du temps de réalisation de la tâche

Concernant le temps de réalisation de la tâche dans son ensemble, l'analyse avec test U de Mann-Whitney ne montrait pas de différence significative entre les deux groupes ($U = 107$, $p = 0.22$) pour l'hypothèse $P < N$. En effet, les participants du groupe P ont réalisé la tâche en $M = 166s$ ($SD = 49.1$) contre $M = 199s$ ($SD = 84.2$) pour le groupe N.

3.2.2 Analyse du temps de réalisation des sous-tâches

La plupart des sous-tâches consistaient simplement à manipuler des objets (la porte de l'armoire et les prises) mais quatre d'entre elles correspondaient à un moment où le participant devait analyser la situation et prendre une décision en vérifiant le taux d'usure des prises : les sous-tâches ST4, ST7, ST 11 et ST 14. Concernant les nombreuses tâches de manipulation, l'analyse n'a pas permis de mettre en évidence une différence significative du temps de réalisation entre les deux groupes. En revanche, la pression temporelle a un effet significatif sur le temps de réalisation des sous-tâches liées à la prise de décision à savoir les ST 4, 7 et 11 (Tableau 1). Bien qu'ils soient soumis à une pression temporelle, les participants du groupe P ont pris plus de temps pour vérifier le taux d'usure de la pièce.

Tableau 1 : Résultats des tests U de Mann-Whitney pour les sous-tâches de prise de décision

Sous-tâches	Résultats du test U de Mann-Whitney (hp : P > N)	Temps moyen et écart-type du groupe P	Temps moyen et écart-type du groupe N
ST4	U = 69.5 , p = 0.029 *	2.07s (SD = 0.704)	1.67s (SD = 1.11)
ST7	U = 72, p = 0.040 *	2.60 (SD = 1.61)	1.80s (SD = 1.42)
ST11	U = 71.5, p=0.022 *	3.03s (SD = 1.22)	2.31s (SD = 2.27)
ST14	U = 80.5, p = 0.140	3.63s (SD = 2.82)	3.43s (SD = 4.50)

3.2.3 Analyse du nombre de répétition des sous-tâches

Afin d'analyser la stratégie mise en place par les participants pour réaliser la tâche, le nombre de sous-tâches répétées a été analysé. Le test U de Mann-Whitney qui a été réalisé ne montre pas de différence significative (U = 34.5, p = 0.998) pour l'hypothèse N > P. En revanche, on observe une différence significative pour le test N ≠ P (U = 34.5, p < .01). Les participants du groupe P répétaient donc davantage de sous-tâches (M = 4.58, SD = 3.60) que ceux du groupe N (M = 1.20, SD = 2.68) (figure 3) contrairement à notre hypothèse de départ.

3.2.4 Analyse du temps d'exploration en fonction du temps de réalisation de la tâche

Lors de l'analyse de la tâche, des périodes de temps pendant lesquelles les participants ne réalisent pas de sous-tâches ont été observées. Ces moments ont été définis comme du temps d'exploration. Il s'agit des moments où les participants relisent les consignes, observent les éléments utiles pour réaliser la tâche ou réfléchissent et ne font rien. Les ratios entre le temps d'exploration et le temps de réalisation total de la tâche ont été calculés et analysés. L'analyse statistique effectuée à l'aide du test U de Mann-Whitney montre une différence significative entre les deux groupes (U = 74, p = 0.021) pour l'hypothèse P < N, de telle sorte que les participants du groupe P passent en moyenne 55.9% (SD = 13.2) du temps total de la tâche à explorer tandis que ceux du groupe N explorent pendant 63.1% (SD = 10.2) de leur temps total.

3.2.5 Analyse du nombre de demandes d'aide, d'erreurs et d'échecs

Concernant le nombre de demandes d'aide, aucune différence significative n'a été relevée entre les deux groupes (U = 128, p = 0.5) pour l'hypothèse P > N. De même, nous n'observons pas de différence significative entre les groupes pour le nombre d'erreurs (U = 120, p = 0.347) et le nombre d'échecs (U = 112, p = 0.154) pour l'hypothèse P > N.

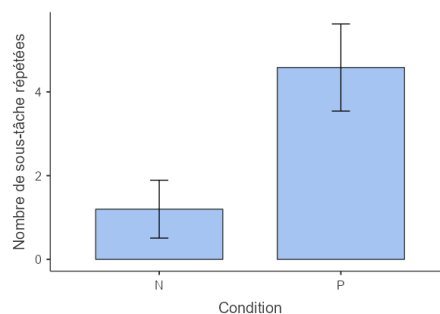


Figure 3 : Nombre moyen et intervalle de confiance (95%) des sous-tâches répétées pour chaque groupe

4 DISCUSSION

Cette étude avait deux objectifs principaux. Le premier consistait à définir une tâche industrielle dont le scénario serait à la fois suffisamment générique et écologique pour fournir des résultats généralisables à tous cas de maintenance industrielle. Le deuxième objectif était de proposer un scénario pertinent et approprié pour évaluer en détail les variations de la charge mentale pendant la tâche. Une analyse cognitive de la tâche a été réalisée pour formaliser le scénario en sous-tâches et estimer le niveau de charge mentale associé à chacune d'entre elles. Les participants ont effectué une tâche avec ou sans contrainte temporelle, tandis que leur charge mentale et leur performance étaient évaluées.

4.1 Évaluation de la charge mentale

L'hypothèse H1 qui concernait l'évaluation des différentes composantes de la charge mentale a été validée en partie. Effectivement, nous trouvons un effet de la pression temporelle pour les dimensions "exigence temporelle" et "performance" de l'échelle NASA-RTLX. En revanche, il n'y a pas de différence significative pour quatre des six dimensions évaluées (exigence mentale, exigence physique, effort et frustration). Cette absence de résultats significatifs pour certaines dimensions du NASA-RTLX pourrait être expliquée par le fait que la tâche est trop facile. Aussi, la tâche était réalisée très rapidement (environ trois minutes). Or, la charge mentale est générée au cours du temps [11], il est donc probable que la tâche ne soit pas assez longue pour générer un niveau de charge mentale suffisamment élevé. L'hypothèse H2 a été validée : nos résultats montrent que les scores moyens de charge mentale sont significativement plus élevés en condition sous pression temporelle.

4.2 Évaluation de la performance à la tâche

Pour l'hypothèse H3, nous anticipions que sous pression temporelle, les participants accompliraient la tâche plus vite, mais avec plus d'erreurs dues à une charge mentale accrue. Une distinction entre les sous-tâches de manipulation et de prise de décision était aussi prévue, les dernières devant prendre plus de temps pour les participants sous pression. Une différence significative dans le temps de prise de décision a été constatée, suggérant une charge mentale supérieure dans ces situations [12,29], confirmant partiellement nos hypothèses et validant l'évaluation préalable de la charge mentale avec la CTAWC. Ainsi, la pression temporelle ralentit l'accomplissement de tâches exigeant plus de ressources cognitives. En revanche, aucune différence significative n'a émergé pour le temps total de la tâche, les demandes d'aide, les erreurs ou les échecs, probablement en raison de la simplicité ou de la brièveté de la tâche [28].

Pour l'hypothèse H4, nous présumions que sous pression temporelle, les participants répéteraient moins de sous-tâches. On pensait également qu'ils exploreraient moins l'environnement. Cependant, nos résultats indiquent le contraire. En condition de pression temporelle, les participants ont effectivement consacré moins de temps à l'exploration, ils ont toutefois répété davantage de sous-tâches que l'autre groupe. Le temps total de réalisation de la tâche est similaire entre les deux groupes, ce qui met en lumière une adaptation stratégique des participants face à la pression temporelle. Ces observations suggèrent que la pression temporelle perturbe la vérification des sous-tâches, incitant les participants à privilégier l'exécution rapide mais avec une confiance moindre [30, 31].

4.3 Évolution du scénario et perspectives de recherche

Plusieurs conclusions sur le scénario ressortent. L'analyse préalable de la charge mentale selon la CTAWC [21] concorde avec les résultats. Disposer d'un outil pour anticiper les fluctuations de charge mentale est essentiel pour éviter les situations de surcharge ou de sous-charge. Cependant, plusieurs limites sont identifiables. Pour optimiser notre scénario, il serait préférable de davantage standardiser la tâche. Nous avons noté que les participants l'ont réalisée sans procédure stricte, compliquant l'analyse. De plus, la tâche est trop rapide. Pour y remédier, nous suggérons d'imposer un ordre de vérification, de faire vérifier six prises au lieu de quatre, et de répéter la tâche pour l'allonger. Pour garantir la complexité, une version facile et difficile pourrait être créée en ajustant les consignes et éléments à vérifier.

Le test du scénario adopte une approche centrée sur l'utilisateur pour une version améliorée. Optimisé, il permettra d'évaluer génériquement de nouvelles interfaces via une analyse ergonomique. Par ex., l'étude utilise un prototype réel, mais pourrait étudier d'autres dispositifs (réalité virtuelle, haptique, interaction homme-robot). Ce scénario est un outil qui permettrait donc d'étudier la charge mentale au cours de diverses interactions, en faisant varier interfaces, consignes et mesures.

5 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michael Rüßmann, Markus Lorenz, Philipp Gerbert, Manuela Waldner, Jan Justus, and Michael Harnisch. 2015. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. *Boston consulting group* 9, 1 (April 2015), 54–89.
- [2] Caterina Cinel, Davide Valeriani, and Riccardo Poli. 2019. Neurotechnologies for Human Cognitive Augmentation: Current State of the Art and Future

- Prospects. *Frontiers in Human Neuroscience*. 13, (January 2019), 1-24. DOI:<https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00013>
- [3] Riccardo Karim Khamaisi, Elisa Prati, Margherita Peruzzini, Roberto Raffaelli, and Marcello Pellicciari. 2021. UX in AR-Supported Industrial Human-Robot Collaborative Tasks: A Systematic Review. *Applied Sciences* 11, 21 (November 2021), 10448. DOI:<https://doi.org/10.3390/app112110448>
 - [4] Donald A. Norman and Stephen W. Draper. 1986. *User-Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction*. CRC Press/Taylor & Francis Group.
 - [5] Norman, D. A. (2004). *Emotional design : Why we love (or hate) everyday things*. Basic Books/Hachette Book Group.
 - [6] Donald A. Norman. 2013. *The design of everyday things : Revised and expanded edition*. Basic Books.
 - [7] Naveen Kumar and Jyoti Kumar. 2019. Efficiency 4.0 for Industry 4.0. *Human Technology* 15, 1 (February 2019), 55–78. DOI:<https://doi.org/10.17011/ht/urn.201902201608>
 - [8] Marie-Pierre Pacaux-Lemoine, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano Rey, and Patrick Millot. 2017. Designing intelligent manufacturing systems through Human-Machine Cooperation principles: A human-centered approach. *Computers & Industrial Engineering* 111, (September 2017), 581–595. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.014>
 - [9] David Romero, Johan Stahre, Thorsten Wuest, Ovidiu Noran, Peter Bernus, Åsa Fast-Berglund, and Dominic Gorecky. 2016. Towards an operator 4.0 typology : a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In the 46th International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE46). Tianjin, China.
 - [10] Mark S. Young, Karel A. Brookhuis, Christopher D. Wickens, and Peter A. Hancock. 2014. State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics* 58, 1 (2014), 1–17. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151>
 - [11] Luca Longo, Christopher D. Wickens, Gabriella Hancock, and P. A. Hancock. 2022. Human Mental Workload: A Survey and a Novel Inclusive Definition. *Front. Psychol.* 13, (June 2022), 883321. DOI:<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.883321>
 - [12] G.M. Hancock, L. Longo, M.S. Young, and P.A. Hancock. 2021. Mental Workload. In *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (5th ed.), Gavriel Salvendy and Waldemar Karwowski (eds.). Wiley, 203–226. DOI:<https://doi.org/10.1002/9781119636113.ch7>
 - [13] Ali Abbas, Joonoh Seo, Seungjun Ahn, Yanfang Luo, Mitchell J. Wyllie, Gun A. Lee and Mark Billingham. 2023. How immersive virtual reality safety training system features impact learning outcomes: An experimental study of forklift training. *Journal of Management in Engineering* 39, 1 (January 2023), 04022068.
 - [14] Chrisantus Eze and Christopher Crick. 2023. Enhancing Human-robot Collaboration by Exploring Intuitive Augmented Reality Design Representations. In *HRI '23 Companion*, Stockholm, Sweden.
 - [15] Michele Gattullo, Enricoandrea Laviola, Alessandro Evangelista, Michele Fiorentino, and Antonio E. Uva. 2022. Towards the Evaluation of Augmented Reality in the Metaverse: Information Presentation Modes. *Applied Sciences* 12, 24 (December 2022), 12600. DOI:<https://doi.org/10.3390/app122412600>
 - [16] Cornelia Gerdenitsch, Andreas Sackl, and Philipp Hold. 2022. Augmented reality assisted assembly: An action regulation theory perspective on performance and user experience. *International Journal of Industrial Ergonomics* 92, (November 2022), 103384. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103384>
 - [17] Jens Keil, Florian Schmitt, Timo Engelke, Holger Graf, and Manuel Olbrich. 2018. Augmented Reality Views: Discussing the Utility of Visual Elements by Mediation Means in Industrial AR from a Design Perspective. In *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Applications in Health, Cultural Heritage, and Industry : 10th International Conference VARM 2018 (Lecture Notes in Computer Science)*, Springer International Publishing, Las Vegas, NV, USA, 298–312. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-319-91584-5_24
 - [18] H. S. Vitense, J. A. Jacko, and V. K. Emery. 2003. Multimodal feedback: an assessment of performance and mental workload. *Ergonomics* 46, 1–3 (2003), 68–87. DOI:<https://doi.org/10.1080/00140130303534>
 - [19] AFNOR (2018). Normes NF EN 13306 – Maintenance – Terminologie de la maintenance.
 - [20] Michele Fiorentino, Antonio E. Uva, Michele Gattullo, Saverio Debernardis, and Giuseppe Monno. 2014. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. *Computers in Industry* 65, 2 (February 2014), 270–278. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.004>
 - [21] Riccardo Masoni, Francesco Ferrise, Monica Bordegoni, Michele Gattullo, Antonio E. Uva, Michele Fiorentino, Ernesto Carrabba, and Michele Di Donato. 2017. Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing* 11, (2017), 1296–1302. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.257>
 - [22] Benjamin M. Knisely, Janell S. Joyner, and Monifa Vaughn-Cooke. 2021. Cognitive task analysis and workload classification. *MethodsX* 8, (2021), 101235. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101235>
 - [23] A. J. Harrow (1972). *A taxonomy of the psychomotor domain: A guide for developing behavioral objectives*. Longman Publishing Group.
 - [24] B.S. Bloom (1956). Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals; *Handbook I: Cognitive domain*. In M. D. Engelhart, E. J. Furst, W. H. Hill, & D. R. Krathwohl (Eds.), *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals; Handbook I: Cognitive domain*. New York: David McKay.
 - [25] J. C. Byers, A. C. Bittner, & S. G. Hill (1989). Traditional and raw task load index (TLX) correlations : Are paired comparisons necessary? *Advances in Industrial Ergonomics and Safety I*.
 - [26] Julien Cegarra and Nicolas Morgado. 2009. Étude des propriétés de la version francophone du NASA-TLX. In *EPIQUE 2009*, Nice, France, 233–239.
 - [27] 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)
 - [28] Thomas Mangin, Michel Audiffren, and Nathalie André. 2023. Réflexions théoriques et méthodologiques autour du concept de fatigue cognitive. *Mov Sport Sci/Sci Mot* (2023). DOI:<https://doi.org/10.1051/sm/2023001>
 - [29] Daniel Kahneman. *Thinking, fast and slow* (2nd ed.). Farrar, Straus and Giroux, New-York.
 - [30] Richard Mayer E. 1997. From Novice to expert. In *Handbook of Human-Computer Interaction* (2nd ed.), Mating G Helander, Thomas K Landauer and Prasad V Prabhu (eds.). Elsevier Science, Amsterdam, Netherland, 781–795.
 - [31] Olivier Houard, L. Bellet, and Alain Vom Hofe. 2012. Variabilité inter- et intra-individuelle des stratégies de réalisation d'une tâche d'assemblage assistée par un document multimédia: Le travail humain Vol. 75, 1 (May 2012), 27–54. DOI:<https://doi.org/10.3917/th.751.0027>

ANNEXE 1 : ANALYSE COGNITIVE DU SCENARIO CONÇU SELON LA CTAWC

Tâche	Sous-tâche niveau 1	Sous-tâche niveau 2	Sous-tâche cognitives et motrice	Niveau de difficulté évalué selon la CTAWC	
T0 : Maintenance d'une armoire électrique	T1 : Ouvrir l'armoire	T1.1 : Déverrouiller le verrou	T1.1.1 : Détecter le verrou	3-Capacités perceptuelles	
			T1.1.2 : Saisir le verrou	2-Mouvements fondamentaux	
			T1.1.3 : Effectuer une rotation à 180°	2-Mouvements fondamentaux	
		T1.2 : Ouvrir la porte	T1.2.1 : Détecter la poignée	3-Capacités perceptuelles	
			T1.2.2 : Saisir la porte	2-Mouvements fondamentaux	
			T1.2.3 : Effectuer une rotation pour ouvrir la porte	2-Mouvements fondamentaux	
		T2 : Vérifier l'état de chaque pièces	T2.1 : Retirer la pièce de son emplacement d'origine	T2.1.1 : Saisir la pièce	2-Mouvements fondamentaux
				T2.1.2 : Forcer vers le haut	4-Capacités physiques
			T2.2 : Vérifier l'état de la prise	T2.2.1 : Effectuer un mouvement de rotation	2-Mouvements fondamentaux
				T2.2.2 : Observer la pastille sous la prise	3-Capacités perceptuelles
	T2.2.3 : Comprendre la règle			2-Compréhension	
	T3 : Remplacer les pièces vérifiées	T3.1 : Réinsérer la prise d'origine	T2.2.4 : Appliquer la règle	3-Application	
			T2.2.5 : Prendre une décision	4-Évaluation	
		T3.2 : Déposer la prise sur le plan de travail	T3.1.1 : Forcer vers le bas	4-Capacités physiques	
			T3.2.1 : Identifier l'endroit adéquat	2-Compréhension	
		T3.3 : Réinsérer une prise en acier ou titane	T3.2.2 : Relâcher la prise	2-Mouvements fondamentaux	
			T3.3.1 : Saisir la pièce	2-Mouvements fondamentaux	
			T3.3.2 : Forcer vers le bas	4-Capacités physiques	
	T4 : Refermer l'armoire	T4.1 : Fermer la porte	T4.1.1 : S'assurer que la tâche est terminée	5-Synthèse	
			T4.1.2 : Détecter la porte	3-Capacités perceptuelles	
T4.1.3 : Saisir la porte			2-Mouvements fondamentaux		
T4.2 : Verrouiller le verrou		T4.1.4 : Effectuer une rotation pour fermer la porte	2-Mouvements fondamentaux		
		T4.2.1 : Détecter le verrou	3-Capacités perceptuelles		
		T4.2.2 : Saisir le verrou	2-Mouvements fondamentaux		
		T4.2.3 : Effectuer une rotation à 180°	2-Mouvements fondamentaux		