

[Page de garde]

HEC MONTRÉAL

**Résoudre les enjeux de l'ergonomie des environnements de travail
multi-écrans grâce à la technologie : Développement d'un outil
innovant intégrant l'IA**

par

Arthur Garnier

Pierre-Majorique Léger, PhD

HEC Montréal

Directeur de recherche

Constantinos Coursaris, PhD

HEC Montréal

Codirecteur de recherche

Sciences de la gestion

Transformation numérique des organisations

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion*

(M. Sc.)

Avril 2024

© Arthur Garnier, 2024

Résumé

Ce mémoire présente l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans à travers deux études complémentaires. La première étude se concentre sur l'identification des défis ergonomiques associés à l'utilisation de configurations multi-écrans et à évaluer l'intérêt des ergonomes pour l'intégration d'outils numériques dans leur pratique. Des entretiens menés avec 7 professionnels ont révélé un besoin d'intégrer des outils technologiques dans le but de soutenir le processus d'évaluation ergonomique, malgré les préoccupations budgétaires et temporelles existantes relatives à ces outils. Ces entretiens ont souligné l'importance de l'observation et de l'analyse de l'activité dans l'évaluation ergonomique, et ont permis de définir les caractéristiques d'un tel outil, le positionnant davantage comme un complément à l'évaluation ergonomique traditionnelle plutôt qu'un remplacement.

La seconde étude vise à concevoir, développer et valider un artefact numérique pour améliorer l'évaluation ergonomique des postes de travail multi-écrans. Cet artefact, développé selon une approche de « design science », utilise des données physiologiques et de mouvement pouvant être couplées à différentes activités ou postures, pour visualiser leurs interactions avec l'environnement de travail et ainsi fournir une analyse quantitative de l'ergonomie. Pour valider l'artefact numérique développé, nous avons employé une méthodologie expérimentale où 20 sujets ont été exposés à 4 configurations multi-écrans différentes, allant d'optimale à sous-optimale et établies selon des normes ergonomiques reconnues. Les résultats montrent que certaines configurations ergonomiques influencent significativement les mesures physiologiques et les mouvements de la tête, confirmant la capacité du logiciel à évaluer l'ergonomie des environnements de travail. Grâce à une approche combinant théorie et pratique, le logiciel est capable de visualiser les interactions des mouvements et de classifier les configurations de travail grâce à l'apprentissage machine, supportant l'ergonome dans l'amélioration de la qualité de vie au travail.

Mots clés : Ergonomie, Environnements multi-écrans, Accéléromètre, Électromyographie (EMG), Apprentissage machine, Analyse de mouvement, Confort de travail, Visualisation de données, Prévention des TMS (Troubles Musculosquelettiques), Optimisation de poste de travail, Ergonomie de bureau, Sphère d'orientation

Méthodes de recherche : Design Science, Validation Expérimentale, Entrevue Qualitative, Apprentissage Machine

Abstract

This thesis presents the ergonomics of multi-screen work environments through two complementary studies. The first study focuses on identifying the ergonomic challenges associated with the use of multi-screen setups and assessing ergonomists' interest in integrating digital tools into their practice. Interviews conducted with 7 professionals revealed a need to integrate technological tools to support the ergonomic process, despite existing budgetary and time concerns related to these tools. These interviews highlighted the importance of observation and activity analysis in ergonomic assessment and helped define the characteristics of such a tool, positioning it more as a complement to traditional ergonomic assessment rather than a replacement.

The second study aims to design, develop, and validate a digital artifact to enhance the ergonomic evaluation of multi-screen workstations. This artifact, developed using a "design science" approach, utilizes physiological and movement data that can be linked to different activities or postures to visualize their interactions with the work environment, thereby providing a quantitative analysis of ergonomics. To validate the developed digital artifact, we employed an experimental methodology where 20 subjects were exposed to 4 different multi-screen configurations, ranging from optimal to suboptimal and established according to recognized ergonomic standards. The results show that certain ergonomic configurations significantly influence physiological measurements and head movements, confirming the software's ability to evaluate the ergonomics of work environments. Through an approach combining theory and practice, the software can visualize the interactions of movements and classify work configurations through machine learning, supporting the ergonomist in improving the quality of work life.

Keywords: Ergonomics, Multi-screen Environments, Accelerometer, Electromyography (EMG), Machine Learning, Movement Analysis, Work Comfort, Data Visualization, Musculoskeletal Disorders Prevention, Workstation Optimization, Office Ergonomics, Orientation Sphere

Research methods: Design Science, Experimental Validation, Qualitative Interview, Machine Learning

Table des matières

<i>Résumé</i>	1
<i>Abstract</i>	2
<i>Table des matières</i>	3
<i>Liste des figures</i>	5
<i>Liste des tableaux</i>	6
<i>Liste des abréviations</i>	8
<i>Remerciements</i>	9
<i>Chapitre 1 : Introduction</i>	10
Tableau de contribution	12
<i>Chapitre 2 : Évaluation ergonomique des environnements de travail multi-écrans : enjeux, outils et innovation</i>	15
Résumé:	15
Mots clés:	15
2.1 Introduction	16
2.2 Objectifs de recherche de ce chapitre	17
2.3 Portrait de l’ergonomie de bureau et du travail d’ergonome	18
2.3.1 Ergonomie de bureau.....	19
2.3.2 Rôle et responsabilité de l’ergonome.....	20
2.4 Méthodologie :	23
2.4.1 Participants et déroulement.....	23
2.4.2 Guide d’entrevue.....	24
2.4.3 Méthode d’analyse	25
2.5 Résultats	25
2.6 Discussion	28
2.7 Conclusion	30
Bibliographie	32
<i>Chapitre 3 : Développement et validation d’un outil de visualisation de l’environnement de travail appliquée à l’ergonomie intégrant l’apprentissage machine</i>	35
Résumé	35
Introduction	36
3.1 Conception et développement	38
3.1.1 Définition des objectifs de la solution (requis système)	38
3.1.2 Instrumentation.....	41
3.1.3 Conception.....	43

3.1.4 Itérations de développement.....	45
3.2 Validation d'un outil de visualisation assisté par IA	60
3.2.1 Développement des hypothèses.....	60
3.2.2 Méthodologie.....	61
3.2.3 Résultats	70
3.2.4 Discussion.....	92
3.2.5 Conclusion.....	93
3.3 Conclusion.....	94
<i>Chapitre 4 : Conclusion et avenues de recherche.....</i>	96
<i>Bibliographie</i>	99
<i>Annexes.....</i>	1
Annexe A :	1
Message de sollicitation (email):	1
Guide d'entrevue.....	3
Thème et Étiquette :	5
Annexe B: Formulaire de consentement.....	6
Annexe C : Protocole	10
Annexe D : Enquête Qualtrics	14
Annexe E : Résultats validation expérimental	16

Liste des figures

Figure 1. Étiquettes les plus fréquentes issues du codage des entrevues	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2. Accéléromètre placé au niveau de la tête	42
Figure 3. Processus de traitement et d'intégration des données vers l'artéfact	44
Figure 4. Diagramme de séquence de l'application	44
Figure 5. Les 5 étapes du développement de l'artéfact numérique.....	46
Figure 6. 1er prototype réalisé sur Unreal Engine	46
Figure 7. Architecture client-serveur à l'itération 4	52
Figure 8. Sphère d'orientation avec calcul de la densité selon les mouvements de la tête.....	53
Figure 9. Affichage de la sphère d'orientation selon les 3 échelles différentes; données issues de la collecte préliminaire dédiée au développement.....	57
Figure 10. Version finale de l'artéfact développé	59
Figure 11. Couple d'écrans représentant chaque condition	64
Figure 12. Angles horizontaux pour chaque configuration : C1 en noir, C2 en mauve, C3 en vert et C4 en bleu	65
Figure 13. Angles verticaux pour chaque configuration : C1 en jaune, C2 en mauve, C3 en vert et C4 en bleu	65
Figure 14. Déroulement de l'expérience de validation.....	66
Figure 15. Comparaison de différentes métriques pour chaque configuration.....	71
Figure 16. Activité musculaire (mesurée par EMG RMS) par participant et condition ergonomique	73
Figure 17. Tangage de la tête en fonction du temps, par participant et condition.....	76
Figure 18. Mouvement horizontal de la tête en fonction du temps, par participant et condition	78

Figure 19. Projection 2D (lacet, tangage) des directions de la tête prises par les participants pour chaque segment ergonomique.	79
Figure 20. Dispersion d'EMG RMS par participant et condition	82
Figure 21. Matrice de corrélation des différentes caractéristiques pour notre modèle.....	88

Liste des tableaux

Tableau 1. Contributions et responsabilités personnelles	13
Tableau 2. Sommaire des participants.....	24
Tableau 3. Occurrences des étiquettes désignant les outils numériques	27
Tableau 4. Exigence système de l'artéfact à développer.....	40
Tableau 5. Sommaire des participants de la phase de validation.....	62
Tableau 6. Statistiques descriptives d'EMG pour chaque configuration ergonomique	72
Tableau 7. Statistiques descriptives du mouvement de la tête verticale par condition.....	74
Tableau 8. Statistiques descriptives pour le mouvement horizontal (lacet) de la tête, par condition	77
Tableau 9. Modèle linéaire mixte de l'effet des conditions ergonomiques (score ergonomique) sur l'activité musculaire (RMS_EMG)	81
Tableau 10. Résultat du test de Wilcoxon entre chaque condition ergonomique.....	82
Tableau 11. Résultat ANOVA type-3 avec le score ergonomique en variable indépendante et la distance euclidienne moyenne en variable dépendante.....	83
Tableau 12. Test de Holm pour chaque paire de scores ergonomique.....	84
Tableau 13. Modèle linéaire mixte de l'effet de la moyenne des distances euclidiennes de la tête sur l'activité musculaire	85
Tableau 14. Meilleurs paramètres des modèles d'apprentissage machine.....	86
Tableau 15. Meilleures Caractéristiques des Modèles d'apprentissage machine.....	87
Tableau 16. Résultats de la validation croisée pour les modèles d'apprentissage machine.....	89

Tableau 17. Résultats des modèles d'apprentissage automatique avec un échantillon de test de 0.25 et stratifié	90
Tableau 18. Récapitulatif des hypothèses et de leur conclusion.....	91

Liste des abréviations

EDA : Activité électrodermale

EMG : Électromyogramme

EEG : Électroencéphalogramme

ECG : Électrocardiogramme

IRSST : Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

KDE : Estimation par noyau de densité

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à plusieurs personnes qui ont joué un rôle crucial dans l'accomplissement de ce mémoire. Tout d'abord, un grand merci à Anaïs, ma collègue de mémoire, pour sa motivation constante et son accompagnement tout au long de cette épreuve. Sa présence et son soutien ont été une source d'inspiration et de persévérance pour moi.

Je souhaite également remercier mes parents et mon frère pour leur encouragement incessant et leur soutien indéfectible. Leur foi en moi et leur patience ont été les piliers de ma réussite.

Un remerciement spécial à Sam pour ses conseils avisés et son expertise. Votre aide a été précieuse dans les moments de doute et a grandement contribué à la qualité de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mes directeurs de mémoire, les professeurs Pierre-Majorique Léger et Constantinos K. Coursaris. Votre mentorat, votre disponibilité, et vos conseils précieux m'ont guidé à travers les défis de ce projet. Intégrer le Tech3Lab a été une expérience inestimable qui m'a permis de développer des compétences et des connaissances essentielles, tant sur le plan professionnel que personnel. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Chapitre 1 : Introduction

Alors que la charge de travail numérique augmente avec les courriels, les messages instantanés et la nécessité de jongler avec diverses plateformes en ligne, de nombreux travailleurs constatent que l'ajout d'un ou deux écrans supplémentaires améliore considérablement la productivité et l'efficacité (Richtel, 2012; Roberston et al., 2005). Cette configuration, qui ressemble à un centre de contrôle de mission, est de plus en plus courante dans les entreprises comme dans les bureaux à domicile (Digital Europe, 2020). La disponibilité de moniteurs plus grands et plus abordables a facilité cette évolution, de nombreux employés estimant que les moniteurs individuels sont une relique du passé. Dans ce contexte professionnel, marqué par une augmentation du travail devant des écrans (Santé Publique France, 2017; Public Health England, 2017), nous observons une augmentation significative du nombre d'espaces de travail à plusieurs écrans (Bigošová et al., 2019; Owens et al., 2012).

Cette transformation, surtout due à son potentiel à accroître la productivité et à l'immense flux de données que les travailleurs doivent maintenant gérer (Mirbabaie et al. 2020), soulève quand même d'importantes interrogations quant à leur impact sur la santé et le bien-être des employés (Robertson, 2009; Ahuja, 2024). Parallèlement, l'incidence des troubles musculosquelettiques (TMS), traditionnellement liés à des activités physiquement exigeantes, s'est étendue aux travailleurs de bureau, et surtout ceux engagés dans l'utilisation prolongée d'ordinateurs (St-Vincent, 2015). La relation entre le temps passé devant des écrans et l'augmentation des cas de TMS met en évidence l'importance de considérer les implications ergonomiques des configurations de travail modernes (Andersen et al., 2011; Gerr et al., 2006; Griffiths et al., 2007; Ijmker et al., 2007; St-Vincent, 2015; Wahlstrom, 2005). La digitalisation des postes de travail et le fait que plus de 60 % des travailleurs au Québec utilisaient des ordinateurs en 2007-2008, contre 30 % en 1989, accentuent la nécessité d'aborder ces enjeux ergonomiques de manière proactive (Poussart, 2002; Vézina et coll., 2011).

Face à cette augmentation de l'utilisation des technologies et des risques ergonomiques qui l'accompagne, le rôle de l'ergonome devient d'autant plus important. Les ergonomes sont des professionnels de la santé et de la sécurité au travail qui s'emploient à concevoir des environnements de travail qui s'adaptent non seulement à la physiologie humaine, mais également aux besoins spécifiques des activités professionnelles. Ils interviennent pour analyser, diagnostiquer et proposer des améliorations dans les configurations de travail, afin de prévenir les troubles musculosquelettiques et d'optimiser le confort et la performance des travailleurs. Dans

un contexte de digitalisation des postes de travail, leur expertise est essentielle pour adapter les espaces de travail traditionnels aux nouvelles configurations et pour s'assurer que de nouveaux problèmes ne soient pas introduits. L'évaluation ergonomique consiste à évaluer de manière approfondie la posture et l'activité, à engager le dialogue avec les utilisateurs pour comprendre leurs besoins, et à effectuer des mesures anthropométriques précises (Jacobs et Brown, 2001). Malgré l'importance de ces pratiques, le secteur souffre d'un manque d'outils technologiques adaptés qui pourraient faciliter et affiner ces évaluations. Surtout dans l'environnement de bureau, où les interactions avec les équipements sont répétées et complexes, les ergonomes se reposent encore largement sur des méthodes traditionnelles, sans le soutien d'instruments numériques avancés qui pourraient améliorer la précision et l'efficacité de leur travail.

Ainsi, il est crucial d'étudier les aspects ergonomiques des configurations multi-écrans, particulièrement dans un contexte où les environnements de travail numériques ont subi d'importantes transformations, sans que les méthodes d'évaluation ergonomique ne s'adaptent nécessairement à ce rythme (Bigošová et al., 2019). En effet, les outils utilisés par les ergonomes sont restés largement inchangés alors que la complexification des milieux professionnels souligne la nécessité d'exploiter les avancées technologiques pour renouveler et améliorer les pratiques ergonomiques. Ce mémoire vise à identifier les principaux enjeux et défis de ces configurations et à proposer une méthode nouvelle et pertinente pour leur évaluation ergonomique. Cette recherche a donc pour but d'améliorer le processus ergonomique et de soutenir le travail crucial des ergonomes en s'appuyant sur les dialogues avec ces professionnels pour conceptualiser, développer et tester une solution numérique adaptée.

Le premier article se concentre sur l'analyse ergonomique des postes de travail multi-écrans à partir d'entretiens avec des professionnels du domaine. Cette étude exploratoire vise à identifier les défis et problématiques courants liés à l'ergonomie des configurations multi-écrans, ainsi que les pratiques et outils technologiques utilisés par les ergonomes pour évaluer et améliorer ces environnements. Les questions de recherche abordées dans cette partie incluent : Quelles sont les principales préoccupations ergonomiques associées à l'utilisation de configurations multi-écrans ? Comment les ergonomes évaluent-ils et interviennent-ils dans ces environnements ? Quelle est leur perception quant à l'utilisation d'outil technologique dans leur travail ?

Le second article s'attache à la conception, au développement, et à la validation d'un artéfact numérique destiné à faciliter l'évaluation ergonomique des postes de travail multi-écrans. Cet artéfact, développé suivant une approche de science de la conception, intègre des données

physiologiques et de mouvement pour offrir une analyse quantitative de l'ergonomie. Le développement de l'artéfact englobe la création d'un algorithme d'apprentissage automatique conçu pour classer automatiquement les configurations ergonomiques des postes de travail. En discernant efficacement entre les configurations ergonomiques optimales et celles qui le sont moins, l'algorithme facilite l'identification des aménagements de travail nécessitant des ajustements, permettant ainsi une intervention ciblée et efficace pour améliorer la santé et le bien-être au travail. Les questions de recherche ici se concentrent sur la faisabilité et l'efficacité de l'outil développé : Est-il possible d'utiliser la visualisation assistée par IA pour évaluer les environnements de travail à plusieurs écrans? Peut-on classifier l'ergonomie d'un environnement de travail à partir de données physiologiques et de mouvement, à l'aide de l'apprentissage machine ?

Méthodologiquement, les deux études adoptent des approches complémentaires pour aborder ces questions. La première utilise des entretiens qualitatifs pour recueillir des indices sur les pratiques actuelles et les besoins des ergonomes, tandis que la seconde emploie une méthodologie en "design science", plus quantitative donc, pour développer et tester un outil basé sur les données. Cette combinaison d'approches vise à comprendre et à identifier des problèmes et enjeux dans un domaine afin de proposer une solution concrète.

En somme, ce mémoire vise à apporter une contribution significative à la compréhension de l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans et à explorer de nouvelles voies pour leur évaluation et amélioration. À travers ces deux articles, nous cherchons à établir un pont entre la recherche ergonomique théorique et l'application pratique, en proposant des solutions innovantes pour répondre aux défis ergonomiques contemporains. Les appels à la recherche futurs pourraient se concentrer sur l'élargissement de la base de données pour l'algorithme de classification, l'évaluation de l'impact des améliorations ergonomiques sur la productivité, et l'intégration de l'outil dans les pratiques courantes des ergonomes pour une validation plus poussée sur le terrain.

Tableau de contribution

L'étude actuelle a été réalisée en collaboration avec une équipe de recherche. Pour mieux comprendre ma contribution au projet de recherche, le tableau 1 ci-dessous résume mes contributions en pourcentage du travail accompli pour chaque étape du projet.

Tableau 1. Contributions et responsabilités personnelles

Étape du processus	Contribution
Définition des besoins du partenaire et des questions de recherche	Identifier les lacunes dans la littérature actuelle et définir le problème de recherche. - 80% <ul style="list-style-type: none"> • Définition des questions de recherche • Identification du logiciel à développer • Orientation par un partenaire industriel
Conception et design expérimental	Configuration des outils de collecte et de l'environnement – 70% <ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'outil développé par le laboratoire (accéléromètre et EMG) • Préparation de la salle et des stimuli Design expérimental –80% <ul style="list-style-type: none"> • Entrevue • Protocole • Questionnaire • Configuration Application au CER - 80% <ul style="list-style-type: none"> • Préparation des documents nécessaires à l'approbation éthique • Validation et assistance par l'équipe de recherche
Pré-tests	En charge des opérations durant les prétests pour les 2 phases de l'étude 2 (développement et validation)
Tests (collecte de données)	Entrevue et retranscription 100% <ul style="list-style-type: none"> • J'ai réalisé 7 entrevues avec des ergonomes et retranscrit l'entièreté des entrevues sur Word. J'ai également procédé au codage de ces entrevues. Opération des collectes de données – 100% <ul style="list-style-type: none"> • Je me suis occupé de tous les participants, pour la phase de collecte pour le développement initiale ainsi que pour la validation.
Conception et développement	Logiciel 90% <ul style="list-style-type: none"> • Choix technologique, conception et développement

	<p>Apprentissage machine 80%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développement d'un algorithme d'apprentissage machine avec la validation du statisticien du laboratoire.
Recrutement	<p>Recrutement de participants pour l'étude – 80%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Je me suis occupé du recrutement des ergonomes ainsi que du recrutement pour la phase de validation et de ses prétests. Le partenaire industriel de l'étude a contribué aux prétests, en mettant à disposition des employés pour participer à l'étude.
Analyse	<p>Réalisation des analyses statistiques – 70%</p> <ul style="list-style-type: none"> • Analyse des résultats sur Jupyter Notebook <p>Formatage et synchronisation des données réalisés avec le soutien et la validation de Shang Lin Chen, co-auteur de l'article.</p>
Écriture du mémoire	<p>Rédaction des articles et de la thèse – 100%</p> <p>Mes superviseurs m'ont guidée tout au long de ce processus grâce à leurs commentaires qui m'ont permis de perfectionner mon mémoire.</p>

Chapitre 2 : Évaluation ergonomique des environnements de travail multi-écrans : enjeux, outils et innovation

Résumé:

Cette étude préliminaire explore l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans à travers la littérature et des entretiens avec des ergonomes. L'objectif est de comprendre leurs pratiques, les défis rencontrés et l'utilisation d'outils technologiques dans l'évaluation ergonomique. Ce chapitre cherche à répondre aux questions suivantes : Quelles sont les principales préoccupations ergonomiques associées à l'utilisation de configurations multi-écrans ? Comment les ergonomes évaluent-ils et interviennent-ils dans ces environnements ? Quelle est leur perception quant à l'utilisation d'outil technologique dans leur travail ?

Pour répondre à ces questions de recherche, 6 entretiens semi-dirigés d'environ 45 minutes ont eu lieu avec des ergonomes professionnels du public et du privé. Les discussions ont révélé l'importance de l'analyse de l'activité, de l'évaluation de la posture et de la discussion avec le travailleur dans le processus ergonomique. Les résultats indiquent un intérêt marqué des ergonomes pour l'intégration d'outils technologiques, malgré des préoccupations budgétaires et temporelles. Un outil combinant la visualisation de l'environnement en 3D, les données physiologiques et le mouvement de la tête, a été identifié comme ayant un potentiel pour améliorer le diagnostic ergonomique, en servant notamment de complément à l'évaluation du poste de travail, grâce à sa capacité à quantifier l'ergonomie et à aider à la prise de décision. Cette recherche souligne la nécessité de concevoir des outils ergonomiques adaptés aux besoins des professionnels pour faciliter leur adoption. Elle constitue une base pour le développement d'un artefact numérique appliqué à l'ergonomie des environnements multi-écrans, ayant ainsi pour objectif l'amélioration de l'ergonomie de bureau et la prévention des troubles musculosquelettiques.

Mots clés:

Ergonomie de bureau, Entretiens avec ergonomes, Analyse qualitative, Environnements de travail multi-écrans, Outils ergonomiques, Prévention des TMS, Interventions ergonomiques, Utilisation de données en ergonomie, Technologies en ergonomie, Analyse de l'activité.

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous plongeons dans l'univers de l'ergonomie de bureau, en mettant un accent particulier sur les postes de travail multi-écrans. Avec un potentiel d'augmentation de la productivité jusqu'à 50% (Robertson et al., 2005) et une montée significative du travail à l'écran (Santé Publique France, 2017; Public Health England, 2017; Digital Europe, 2020), l'ergonomie des configurations multi-écrans se positionne au cœur des enjeux actuels (Dul et Weerdmeester, 2001; Jacobs et Brown, 2001). Bien que ces nouvelles configurations représentent une certaine complexification de l'environnement de travail, le processus d'évaluation ergonomique a peu évolué pour répondre à ces nouveaux défis. Cette situation souligne la pertinence d'intégrer des outils technologiques, actuellement sous-utilisés en ergonomie, pour répondre aux nouveaux besoins de l'évaluation des postes de travail. L'utilisation de l'intelligence artificielle représente une opportunité prometteuse pour améliorer l'évaluation ergonomique, en efficacité et en précision, dans ces contextes nouveaux et complexes (Magoc et Magoc, 2011; Patel et al. 2022). Notre objectif est de saisir pleinement le contexte ergonomique actuel, en explorant les défis et les problématiques courants que rencontrent les professionnels du domaine et plus particulièrement comment les innovations technologiques peuvent répondre à leurs besoins. Nous cherchons à comprendre le processus d'évaluation ergonomique typique et les interventions fréquemment recommandées pour améliorer le bien-être et la productivité des utilisateurs.

Nous nous intéressons également à l'utilisation actuelle des données dans les évaluations ergonomiques. Il s'agit de découvrir comment les ergonomes intègrent les données, notamment celles issues de capteurs spécifiques comme les capteurs d'électrocardiogramme (ECG), les capteurs d'électromyographie (EMG), et les mesures d'activité électrodermale (EDA), dans leur pratique professionnelle. Cette exploration vise à évaluer l'intérêt et la pertinence de ces données dans le contexte ergonomique.

En outre, ce chapitre examine le potentiel et l'implantation des outils numériques dans le travail des ergonomes. Nous cherchons à identifier les outils numériques actuellement employés par ces professionnels et à sonder leur intérêt pour l'utilisation de visualisations sur les interactions entre l'utilisateur et son environnement de travail, notamment à travers la posture ou le mouvement, ou pour d'autres outils numériques innovants. Il est essentiel de comprendre les avantages perçus et les obstacles potentiels à l'intégration de ces outils dans le processus d'évaluation ergonomique.

Enfin, nous utilisons les informations recueillies pour établir une base solide pour le développement de notre outil de visualisation assistée par intelligence artificielle. Notre but est de

s'assurer que cet outil est en parfaite adéquation avec les besoins réels des professionnels de l'ergonomie et qu'il répond efficacement aux défis identifiés. Ce chapitre sert donc de fondement à la conception d'une solution technologique qui vise à améliorer significativement l'évaluation ergonomique des postes de travail multi-écrans. En s'appuyant sur les pistes recueillies auprès des professionnels de l'ergonomie, cette solution cherche à combler le fossé entre les méthodes d'évaluation traditionnelles et les besoins actuels des environnements de travail dynamiques et technologiquement avancés. Cette approche vise non seulement à identifier les configurations de poste de travail potentiellement nuisibles, mais aussi à proposer des ajustements basés sur des données objectives pour optimiser le confort et la performance des utilisateurs.

Ce chapitre débute par une revue de la littérature sur l'ergonomie des postes de travail multi-écrans, explorant les défis ergonomiques et les méthodes d'évaluation employées par les ergonomes. Nous poursuivons avec une description de notre méthodologie d'entretien, visant à compléter la revue de littérature et recueillir des perspectives sur l'utilisation des technologies dans l'évaluation ergonomique. Les résultats présentent les thèmes principaux issus des entretiens, suivis d'une discussion qui met en relation ces résultats avec les connaissances existantes et explore leurs implications pour la pratique ergonomique. La conclusion récapitule les apports de l'étude et propose des directions pour la recherche future, soulignant l'importance de l'innovation technologique dans l'amélioration de l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans.

2.2 Objectifs de recherche de ce chapitre

Pour enrichir notre compréhension de l'ergonomie de bureau, nous avons établi plusieurs objectifs, visant à obtenir une vue d'ensemble de l'ergonomie, du rôle et des responsabilités de l'ergonome, ainsi que de l'intégration de la technologie dans ce domaine.

Leurs objectifs étaient les suivants :

Comprendre le contexte ergonomique actuel

- Identifier les défis et problématiques courants liés à l'ergonomie des postes de travail multi-écrans à partir de l'expérience des professionnels du domaine.
- Comprendre le processus d'évaluation ergonomique typique et les interventions couramment recommandées.

Évaluer l'utilisation actuelle des données

- Découvrir comment les ergonomes utilisent les données dans leurs évaluations.
- Évaluer l'intérêt et la pertinence des données provenant de capteurs spécifiques (accéléromètres, capteurs EMG, mesures d'EDA) dans le contexte ergonomique.

Évaluer le potentiel et l'implantation des outils numériques

- Identifier les outils numériques employés par les ergonomes
- Sonder l'intérêt des ergonomes pour l'utilisation de visualisations 3D ou d'outil numérique dans leur travail.
- Identifier les avantages perçus et les obstacles potentiels à l'intégration de tels outils dans le processus d'évaluation ergonomique.

Établir une base pour le développement de l'outil

- Utiliser les informations recueillies pour définir clairement les besoins et les exigences de l'outil de visualisation.
- Assurer que l'outil développé est aligné avec les besoins réels des professionnels de l'ergonomie et qu'il répond aux défis identifiés.

Dans un premier temps, on parcourt le contexte ergonomique actuel et les défis associés aux postes de travail multi-écrans à travers la littérature disponible, puis dans un second temps, on présentera la méthodologie utilisée pour approfondir ces questions grâce à des entrevues avec des ergonomes professionnels. Elle détaillera comment nous avons recueilli et analysé les données pour comprendre l'évaluation ergonomique typique, l'utilisation des données, et l'intérêt pour les outils numériques. Cette approche méthodologique vise à établir une base solide pour le développement d'un outil de visualisation adapté aux besoins ergonomiques.

2.3 Portrait de l'ergonomie de bureau et du travail d'ergonome

À l'ère numérique actuelle, les environnements de travail multi-écrans sont devenus la norme dans de nombreux domaines professionnels (Ritchel, 2012). Que ce soit dans les centres de contrôle, les studios de design, les bureaux de trading ou même les configurations de bureau standard, l'utilisation de plusieurs écrans est courante (Ritchel, 2012). Cette évolution vise à améliorer la productivité, offrant aux utilisateurs la possibilité de gérer simultanément plusieurs informations ou applications (Colvin et al., 2004).

Les études indiquent que les configurations multi-écrans (2 écrans ou plus) peuvent améliorer la productivité de 9% à 50% et atteignant 42% en moyenne (Robertson et al., 2005; Jon Peddie Research, 2009). De plus, un rapport de la Société des facteurs humains et de l'ergonomie a révélé que 98% des participants préféraient une configuration à double écran, notant une amélioration significative de la performance et une réduction de la frustration par rapport à un seul écran (Owens et al., 2012). Cette tendance s'inscrit dans un contexte où le travail à l'écran augmente, passant de 36% à 52% entre 1994 et 2010, et une population ayant un temps moyen d'écrans passant de 3h10 à 5h07, entre 2014 et 2016 (Santé publique France, 2017).

L'ensemble de ces facteurs illustre que l'ergonomie des configurations multi-écrans représente un phénomène significatif, nécessitant une compréhension approfondie de ses implications sur la santé et le bien-être des utilisateurs. En effet, si les avantages en termes d'amélioration de la performance et de satisfaction sont bien documentés, ils s'accompagnent de défis ergonomiques non négligeables (Klassen, 2019) et moins recherchés. Les interactions constantes entre différents écrans peuvent entraîner des mouvements répétitifs de la tête et des yeux, potentiellement sources de fatigue et de tension (Anshel, 2007). De plus, la disposition et l'orientation des écrans peuvent influencer la posture, le niveau de confort et, à long terme, la santé des utilisateurs (Woo, 2016). La nécessité de comprendre comment les travailleurs interagissent avec ces environnements est donc primordiale (Hignett, 2005). Il ne s'agit pas seulement d'optimiser la productivité, mais aussi de garantir le bien-être et la santé des utilisateurs.

Dans ce contexte, cette étude cherche à comprendre les défis ergonomiques associés aux environnements de travail multi-écrans et à examiner comment un outil technologique pourrait aider à les adresser efficacement.

2.3.1 Ergonomie de bureau

Dans cette section, nous examinons l'impact des interventions ergonomiques sur le bien-être et la productivité des travailleurs de bureau, en nous appuyant sur les travaux de Fernandez (1995) et les études compilées par l'IRSST (2015). Ces recherches soulignent l'importance cruciale de l'ergonomie dans les environnements de travail, notamment en bureautique, et soulignent le rôle essentiel des ergonomes.

Ces professionnels se focalisent sur la compatibilité entre les capacités des opérateurs et les exigences des tâches afin d'optimiser la santé, la sécurité et l'efficacité des employés (Hutchings, 2022). En analysant les interactions entre les travailleurs et leur environnement, les ergonomes proposent des solutions pour prévenir les troubles musculosquelettiques, réduire la fatigue et améliorer les processus de travail (Jacobs et Brown, 2001). Leur intervention, basée sur une approche scientifique et collaborative, est déterminante pour aligner les pratiques de travail avec les capacités humaines et les objectifs organisationnels (Hignett, 2005). Cette démarche est illustrée par les études de Fernandez et les rapports de l'IRSST, qui mettent en avant des interventions ergonomiques réussies et leur impact positif sur les lieux de travail.

Fernandez (1995) a mis l'accent sur la nécessité de concevoir des systèmes de travail ergonomiques pour minimiser les risques de blessures, augmenter l'efficacité du travail et améliorer la qualité de vie des employés. Il a souligné l'importance d'adapter les postes de travail

à la diversité des travailleurs, notamment dès la phase de conception, pour une meilleure correspondance entre l'environnement et le travail à effectuer.

L'IRSSST a examiné diverses interventions ergonomiques à travers le monde, soulignant leur impact sur les troubles musculosquelettiques (TMS). Les TMS désignent un ensemble de pathologies affectant les structures soutenant le corps humain : muscles, tendons, ligaments, nerfs, et articulations, principalement dans la région du dos, des épaules, des mains, et des poignets. Ces troubles sont souvent liés à des gestes répétitifs, des postures prolongées ou inadéquates, et peuvent être exacerbés par un environnement de travail mal adapté. Il a été constaté que des formations en ergonomie ont significativement amélioré les comportements des travailleurs, leur permettant d'ajuster eux-mêmes leurs postes de travail pour une meilleure posture, sans nécessiter de changements majeurs dans l'environnement (St-Vincent, 2015). En outre, les interventions ergonomiques englobent non seulement des formations, mais aussi des évaluations individuelles de poste de travail et des ajustements d'équipement. Ces éléments sont décrits comme essentiels pour réduire les symptômes de TMS et pour leur prévention proactive dans des situations spécifiques (St-Vincent, 2015). Par exemple, une intervention ergonomique, comprenant l'introduction d'une nouvelle chaise ajustable, a conduit à une réduction significative des symptômes visuels et des TMS chez les employés de bureau, soulignant ainsi l'importance de l'adaptation de l'équipement et de la formation pour un impact durable (Amick et al., 2012).

Des études telles que celle de Choobineh et al. (2011) ont montré que l'application complète des recommandations ergonomiques à la suite d'une formation peut entraîner des améliorations significatives dans les symptômes de TMS. Sigurdsson et al. (2011) a également démontré que des interventions ergonomiques minimales, comme la rétroaction en temps réel sur la posture, peuvent être bénéfiques.

En résumé, l'ergonome joue un rôle crucial dans l'identification, l'évaluation et la mise en œuvre de stratégies ergonomiques pour promouvoir un environnement de travail sain. Les interventions ergonomiques sont variées et peuvent inclure des formations, des ajustements de poste de travail, l'acquisition de nouveaux équipements, et même des changements organisationnels pour répondre aux besoins spécifiques des travailleurs. Ces interventions sont conçues non seulement pour améliorer la posture et réduire les TMS, mais aussi pour renforcer la prévention et la productivité au travail (Fernandez, 1995; St-Vincent, 2015).

2.3.2 Rôle et responsabilité de l'ergonome

La profession d'ergonome joue un rôle crucial dans la prévention des troubles musculosquelettiques (TMS), surtout dans les milieux de bureau où l'usage intensif d'ordinateurs

est fréquent. Mais quelles sont précisément les fonctions et responsabilités d'un ergonome ? Il convient de souligner que les tâches de l'ergonome diffèrent selon le secteur d'activité, avec des distinctions notables dans leurs approches et méthodologies.

Pour les ergonomes d'entreprises et en pratique privée, leur responsabilité consiste souvent à réaliser des évaluations correctives détaillées des postes de travail. Cela implique une observation directe et une analyse des conditions de travail pour identifier les risques et proposer des améliorations, telles que l'ajustement du mobilier ou le remplacement d'équipements inadéquats pour optimiser la posture et réduire la tension sur le corps (St-Vincent, 2015). Les ergonomes peuvent également être impliqués dans le processus d'achat, en recommandant des équipements ergonomiques spécifiques comme des claviers moins larges ou des chaises ajustables, pour améliorer le confort et la performance des employés.

Les ergonomes affiliés à des organismes sectoriels de service interviennent plutôt par le biais de la formation de personnes-ressources et par la diffusion d'informations sur des sites intranet et internet, ce que font aussi les ergonomes d'entreprises. Cela peut inclure la création et la diffusion de matériel éducatif ou l'organisation d'ateliers pour enseigner les bonnes pratiques ergonomiques (St-Vincent, 2015).

L'évaluation des postes commence généralement par une discussion avec l'employé pour comprendre les symptômes de douleur et examiner comment les activités quotidiennes et l'utilisation des équipements contribuent à ces symptômes. L'ergonome effectue alors une évaluation sur site pour identifier les facteurs de risque et recommander des solutions, souvent en utilisant le mobilier et l'équipement existant avant de suggérer des achats supplémentaires (St-Vincent, 2015).

L'analyse du travail en bureautique, souvent considérée comme moins complexe que dans les milieux industriels, permet une intervention plus directe et simplifiée. Les ergonomes peuvent utiliser divers outils et méthodes pour évaluer les postes, y compris des grilles d'analyse, des questionnaires, des prises de photos, et l'application de connaissances en anthropométrie. Ils peuvent également apporter des équipements d'essai et suggérer des exercices d'étirement pour améliorer la flexibilité et la force (St-Vincent, 2015).

Le suivi post-évaluation est également crucial pour vérifier l'efficacité des interventions recommandées. Ce suivi peut se faire par courriel ou téléphone, offrant aux employés une opportunité de discuter de l'efficacité des ajustements et de demander des conseils supplémentaires si nécessaire.

En somme, les ergonomes jouent un rôle de pivot dans l'établissement d'un environnement de travail sain et productif, avec des tâches allant de l'évaluation corrective à la formation et au suivi, tout en abordant les préoccupations physiques et psychosociales des employés.

Avec le progrès rapide de la technologie, l'ergonomie des postes de travail informatiques doit être constamment réévaluée pour s'adapter aux nouvelles configurations, notamment l'utilisation de plusieurs écrans. Les ergonomes sont chargés de concevoir des postes de travail qui réduisent les risques de TMS, en tenant compte de la diversité des utilisateurs et de leurs interactions avec une technologie en évolution (St-Vincent, 2015; Woo et al., 2016). Ces configurations doivent minimiser la rotation et l'élévation du cou en alignant les moniteurs avec la ligne de vue de l'utilisateur, en conformité avec les dernières recherches en ergonomie et les résultats des standards actuels (Woo et al., 2016).

L'ergonome collabore avec les départements informatiques et des achats pour assurer que les équipements sélectionnés répondent aux besoins ergonomiques des utilisateurs. En s'appuyant sur des normes de conception de postes de travail informatiques, l'ergonome influence l'achat de mobilier et d'équipements qui soutiennent la santé et la productivité des travailleurs (St-Vincent, 2015). Cette collaboration interdépartementale est cruciale pour intégrer les principes ergonomiques dès le début du processus d'achat (Woo et al., 2016).

L'intégration des facteurs psychosociaux et organisationnels reste un défi dans de nombreuses pratiques de prévention ergonomique. Les ergonomes doivent collaborer avec des architectes et des designers dès la phase initiale de conception pour intégrer l'ergonomie dans la conception d'espaces de travail qui correspondent à une main-d'œuvre diverse et variée (St-Vincent, 2015). Les programmes d'ergonomie participative doivent être flexibles et inclusifs, permettant aux employés de contribuer à la planification et au contrôle de leur environnement de travail (Hignett et al., 2005). Le succès de ces interventions repose sur une évaluation et une éducation continue, pour que les utilisateurs puissent utiliser efficacement et confortablement leur poste de travail.

Si l'analyse précédente a révélé l'importance cruciale des ergonomes dans l'adaptation des postes de travail aux avancées technologiques et aux besoins des utilisateurs, elle soulève également des questions sur l'intégration efficace des outils technologiques et l'utilisation des données dans l'ergonomie. Ainsi, la section suivante présente la méthodologie visant à compléter cette revue de littérature

2.4 Méthodologie :

Pour répondre aux objectifs de cette recherche, une étude qualitative exploratoire a été conçue, s'appuyant sur des entretiens comme principale méthodologie. Cette approche vise à approfondir notre compréhension des enjeux ergonomiques liés aux environnements de travail multi-écrans, en explorant les perspectives et expériences des professionnels du domaine.

2.4.1 Participants et déroulement

Au total, six entrevues ont été menées, impliquant sept ergonomes, dont une entrevue a réuni deux professionnels simultanément. Ces ergonomes ont été identifiés et contactés grâce au répertoire des membres de l'Association professionnelle des ergonomes du Québec, accessible via leur site web officiel¹. Un message de sollicitation formelle (annexe A) à participer à l'étude leur a été envoyé par courriel, pièce jointe duquel se trouvait un formulaire de consentement (voir Annexe A). Il était précisé dans cette sollicitation que notre recherche s'effectue en collaboration avec une chaire de recherche, qu'elle portait sur l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans, et que nous travaillons sur une application de visualisation. Ce projet a fait l'objet de l'approbation du comité d'éthique de HEC Montréal (CER) qui a examiné et validé le formulaire de consentement, le message de sollicitation et le guide d'entrevue (numéro de référence : 2023-5389, en annexe A).

Les entrevues semi-structurées ont été réalisées à distance via la plateforme Teams. Pour garantir la fiabilité des données recueillies et leur intégrité, au cas où un problème technique devrait intervenir, une méthode d'enregistrement avec redondance a été employée : on enregistre à la fois via le logiciel OBS stocké sur l'ordinateur personnel du chercheur, et à la fois grâce à la fonction d'enregistrement intégrée de Teams. Il est à noter que l'enregistrement n'a été initié qu'après avoir reçu le consentement explicite, qu'il soit écrit ou verbal, des participants lors de l'entrevue.

Parmi les participants sollicités pour cette phase, la diversité de leurs rôles professionnels en tant qu'expert en ergonomie était notable et est décrit à travers le tableau 2. Deux d'entre eux étaient principalement engagés dans des activités de recherche. Quatre avaient des fonctions d'interventionnistes, couvrant des domaines tels que la réadaptation, la prévention et l'intervention directe. Enfin, un participant occupait un poste de direction, apportant ainsi une perspective managériale à notre échantillon. Cet échantillon reflète donc une gamme étendue d'expertises et

¹ https://www.ergonomes-professionnels.com/liste_des_membres

de perspectives en ergonomie, couvrant trois niveaux distincts d'engagement dans le domaine : la recherche, l'intervention, et la gestion.

Tableau 2. *Sommaire des participants*

Participant	Rôle	Secteur
P01	Chercheur(e) en Ergonomie (x2)	Public
P02	Ergonome (intervention)	Public
P03	Ergothérapeute	Privé
P04	Ergonome (intervention)	Privé
P05	Ergonome (direction)	Public
P06	Ergonome (intervention)	Privé

Ces 6 sessions ont duré en moyenne 35 minutes, avec une entrevue exceptionnelle d'une heure où deux ergonomes ont participé simultanément. À la suite de ces sessions, tous les enregistrements ont été transcrits manuellement, pour faciliter l'analyse. Chaque transcrit comptait en moyenne 5000 mots chacun.

2.4.2 Guide d'entrevue

Le guide d'entrevue a été soigneusement élaboré pour répondre aux objectifs mentionnés dans la section précédente. Les questions ont été conçues pour obtenir des informations détaillées sur l'expérience des ergonomes, leurs pratiques actuelles, et leur perception des outils numériques. Les principales thématiques abordées dans le guide d'entrevue sont :

Compréhension du rôle et des responsabilités : Ces questions visent à comprendre le processus typique d'évaluation ergonomique et les défis couramment rencontrés.

Interventions fréquentes : Cette section explore les problèmes courants liés aux multi-écrans et les recommandations faites par les ergonomes pour améliorer l'ergonomie des postes de travail.

Utilisation des données : L'emphase est mise sur les types de données utilisées par les ergonomes et l'intérêt potentiel pour des outils numériques innovants.

Outil numérique : Cette section se concentre spécifiquement sur la perception des ergonomes concernant l'utilisation d'outil numérique (incluant la visualisation 3D) dans leur travail.

Pour un aperçu détaillé des questions posées, veuillez consulter l'Annexe A.

2.4.3 Méthode d'analyse

L'analyse qualitative est une démarche méthodologique qui vise à extraire des informations pertinentes à partir de données non structurées, telles que des entrevues. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour une analyse thématique, une méthode qui permet de dégager des thèmes ou des motifs récurrents à partir des données recueillies.

La première étape de cette analyse a consisté à coder les verbatims et les réponses des participants. Pour faciliter cette tâche, nous avons utilisé OptimalWorkshop (Optimal Workshop Ltd., 2024), un outil spécialisé dans l'analyse qualitative, qui a grandement aidé à coder les thèmes, à structurer et organiser les données. Ce codage a été réalisé à l'aide d'étiquettes préalablement définies, qui ont ensuite été regroupées en cinq catégories principales :

1. **Muscles sollicités** : Cette catégorie vise à identifier les muscles mentionnés par les ergonomes comme étant pertinents à étudier dans le contexte multi-écrans et susceptibles d'être mesurés par l'EMG. Parmi les étiquettes associées à cette catégorie, on retrouve des termes tels que « cou », « épaule » et « poignet ».
2. **Rôle, responsabilité et enjeux** : Cette catégorie cherche à cerner les responsabilités des ergonomes et les défis auxquels ils sont confrontés. Elle inclut des étiquettes telles que « convaincre », « problème existant risque » et « problème d'autonomie ».
3. **Utilisation des données** : L'objectif de cette catégorie est de déterminer les types de données utilisés par les ergonomes dans leur travail. Elle englobe des étiquettes telles que « mesure anthropométrique », « activité » et « posture ».
4. **Outil numérique** : Cette catégorie se concentre sur les outils numériques mentionnés par les ergonomes. Les étiquettes associées à cette catégorie incluent des termes comme « budget », « fiabilité » et « temps ».
5. **Sentiment et réaction** : Enfin, cette dernière catégorie vise à capter les émotions et les réactions des participants, qu'elles soient positives ou négatives. Elle comprend des étiquettes telles que « inquiétude », « intérêt » et « doute ».

Cette structuration thématique a permis d'organiser les données de manière cohérente et systématique, facilitant ainsi l'interprétation et la compréhension des résultats.

L'ensemble des groupes et des étiquettes utilisés est disponible dans l'annexe A.

2.5 Résultats

Dans cette étude, plusieurs aspects clés de l'évaluation ergonomique ont été examinés. L'importance de l'analyse de l'activité a été particulièrement mise en avant, avec 26 mentions dans

les entretiens, soulignant son rôle central dans le processus ergonomique. Comme l'indique un participant :

“Ça va être plus de l'observation, des questions et l'analyse de l'activité de travail qu'on fait. Puis ça va être d'observation et des échanges, entrevues ou verbalisation.” (P01).

C'est aussi le sujet qui est revenu le plus de fois à travers les entrevues, comme le montre la figure 1. Les mesures anthropométriques, telles que la hauteur et la portée, ont été identifiées comme essentielles pour personnaliser le poste de travail, avec 12 mentions de la hauteur du mobilier et 11 de la posture. Ces mesures sont souvent prises à l'aide de ruban à mesurer, d'équerre, ou d'applications sur smartphone. La posture, évaluée par des photos, est également reconnue comme un facteur crucial pour comprendre les habitudes de travail d'une personne.

Concernant les zones d'intérêt musculaire et l'utilisation d'outils technologiques, la nuque et le cou ont été spécifiquement mentionnés 14 fois, surtout dans les environnements multi-écrans. Les poignets et les épaules ont également été cités, reflétant les préoccupations ergonomiques dans ces zones.

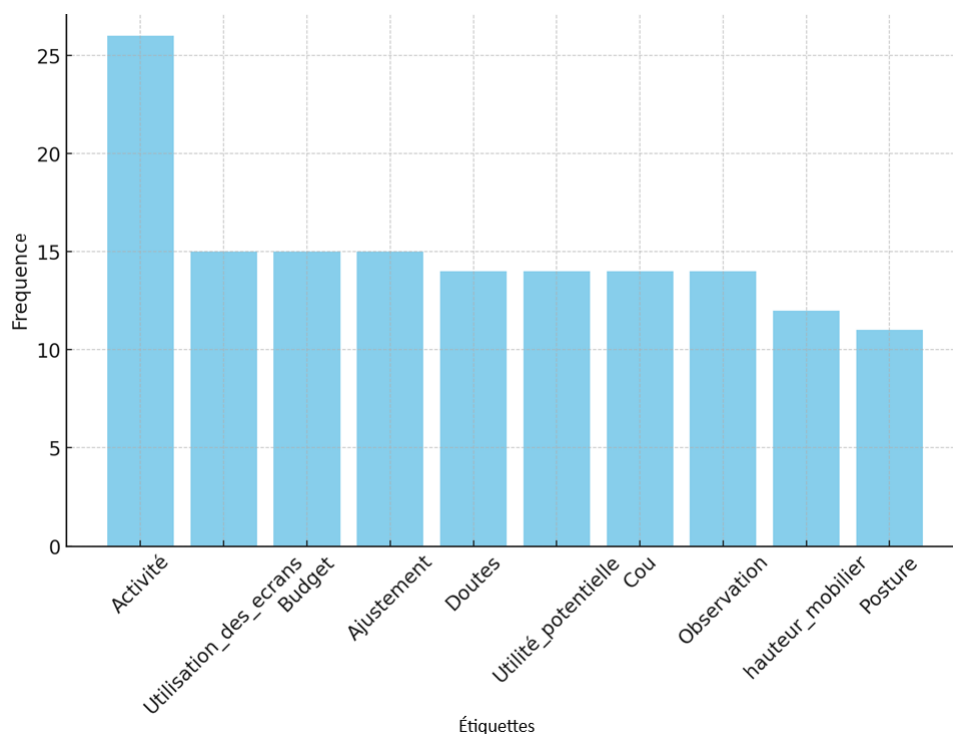


Figure 1. Étiquettes les plus fréquentes issues du codage des entrevues

Le tableau 3 présente l'ensemble des occurrences d'une étiquette sur le thème des outils technologiques, servant à l'analyse. Cette analyse quantitative a de ce fait révélé une attention significative portée au temps, mentionné 9 fois, et au budget, également cité 11 fois, indiquant des

préoccupations pratiques et financières quant aux interventions. Par ailleurs, le doute a été exprimé à 13 reprises, reflétant ces mêmes préoccupations. Quatre des six ergonomes ont exprimé un intérêt pour l'utilisation d'outils technologiques, malgré ces préoccupations budgétaires et temporelles.

“Il y a des trucs qui existent, mais, et à ma connaissance, les gens dans les milieux de travail, qui sont probablement la cible, des intervenants, des consultants, des gens dans les entreprises, ils n'utilisent pas ces affaires. Ça coûte cher, ils n'ont pas les moyens et puis souvent ça prend du temps à mettre en place, ça coûte trop cher.” (P01)

L'intérêt pour l'outil proposé dans cette étude a été notable, en particulier pour le réaménagement des postes de travail, notamment à travers l'analyse quantitative où un “intérêt” a été relevé 9 fois au long des entrevues et une “utilité potentielle” perçut 14 fois.

“Cet équipement pourrait être intéressant. Car cela influence un choix dans une salle, et cela pourrait être répété dans plusieurs bureaux canadiens. Cela pourrait être intéressant. C'est facile à utiliser. Ensuite, on peut discuter avec le travailleur. Lui montrer où il porte le plus son regard. Serait-il mieux de placer tel ou tel écran ici?” (P02)

La capacité de visualiser des données issues de capteurs a été perçue comme un avantage significatif.

“Je pense que cela pourrait être intéressant, par exemple, si une entreprise aménage des postes de travail et souhaite savoir ce qui est le plus efficace. Est-ce que cela vaut la peine d'investir dans un écran de telle manière ? Parfois, ces outils peuvent aider à convaincre.” (P03)

En conclusion, ces résultats soulignent l'importance de l'analyse de l'activité et de la posture en ergonomie, tout en mettant en évidence le potentiel et les défis liés à l'utilisation d'outils technologiques dans ce domaine. La fréquence des termes tels que "activité", "utilisation des écrans", "budget", "ajustement", "doutes", et "utilité potentielle" dans les entretiens quantitatifs renforce ces constatations.

Tableau 3. Occurrences des étiquettes désignant les outils numériques

Étiquette	Occurrences
Activité	10
Temps	9
Budget	11
Intérêt	9
Doutes	13

2.6 Discussion

Avant d'aborder en détail les résultats obtenus, il est essentiel de rappeler les objectifs de recherche qui ont guidé cette étude. Notre enquête visait principalement à explorer les défis ergonomiques associés aux environnements de travail multi-écrans, à comprendre comment les ergonomes évaluent et interviennent dans ces contextes, et à examiner leur perception de l'utilisation des outils technologiques dans leur pratique. Ces objectifs ont orienté notre démarche méthodologique et ont été le fil conducteur de notre analyse, permettant ainsi de situer nos découvertes dans le cadre plus large des enjeux ergonomiques actuels et des innovations technologiques dans le domaine.

Les résultats ont souligné plusieurs aspects cruciaux de l'évaluation ergonomique, démontrant l'importance de l'analyse de l'activité dans le processus ergonomique. Cette constatation corrobore les recherches existantes qui mettent en avant la nécessité de comprendre en profondeur les tâches et comportements des individus dans leur environnement de travail pour une évaluation ergonomique efficace (St-Vincent, 2015). L'accent mis sur l'observation et l'analyse de l'activité reflète une approche holistique, reconnaissant que les solutions ergonomiques doivent intégrer à la fois les aspects physiques et comportementaux.

Les mesures anthropométriques et la posture, bien que considérée comme importantes, semblent être des compléments à l'analyse de l'activité plutôt que des substituts. Cette approche suggère que les solutions ergonomiques doivent être globales, prenant en compte à la fois les dimensions physiques et les comportements des individus au travail, soulignant ainsi son aspect collaboratif. L'utilisation de technologies telles que les applications sur smartphone pour les mesures anthropométriques indiquent une tendance vers l'intégration de solutions numériques plus accessibles dans l'évaluation ergonomique. Cependant, l'objectif de ces solutions ne devrait pas être de remplacer le processus actuel, mais plutôt de venir le compléter, dans le sens où l'observation par l'ergonome et la collaboration entre le patient et l'ergonome demeurent des dimensions essentielles à l'évaluation ergonomique.

L'intérêt manifesté par les ergonomes pour l'utilisation d'outils technologiques révèle un potentiel significatif pour l'amélioration des évaluations ergonomiques. Cependant, les préoccupations liées au budget et au temps constituent des obstacles majeurs. Ces défis soulignent la nécessité de développer des solutions technologiques abordables et faciles à intégrer dans les pratiques existantes. La réticence à adopter des outils coûteux et complexes suggère que l'industrie pourrait bénéficier de solutions plus conviviales et économiquement viables.

L'intérêt pour l'outil proposé dans cette étude, en particulier pour le réaménagement des postes de travail et l'auto-évaluation, suggère un besoin non satisfait dans le domaine de l'ergonomie. La capacité de visualiser des données issues de capteurs physiologiques et de mouvement pourrait offrir des perspectives nouvelles pour l'évaluation et l'amélioration des postes de travail. Cela indique également une ouverture des professionnels de l'ergonomie à intégrer des outils numériques innovants dans leur pratique.

Dans le cadre de notre discussion sur les outils technologiques actuels en ergonomie, il convient de souligner un exemple particulièrement pertinent : le logiciel CaptivErgo (TEA, 2024). Cet outil, mentionné à plusieurs reprises lors de nos entretiens avec les ergonomes, se révèle être en adéquation avec les objectifs visés par notre étude, illustrant ainsi l'intersection entre la pratique ergonomique et l'innovation technologique. CaptivErgo est un outil qui se distingue par son application spécifique à l'ergonomie et son utilisation de divers capteurs pour l'évaluation. Bien que principalement utilisé dans le contexte manufacturier, CaptivErgo intègre des capteurs d'ECG, d'EMG et de mouvement, offrant une approche complète de l'analyse ergonomique.

Ce logiciel, développé par Teaergo (TEA, 2024), est une solution avancée pour l'étude du comportement humain, spécialement conçue pour répondre aux besoins des professionnels de l'ergonomie. La plateforme se caractérise par sa capacité à intégrer et synchroniser des données issues de divers capteurs, y compris le suivi des yeux et l'électroencéphalogramme (EEG), permettant une analyse détaillée du comportement humain dans des contextes de travail variés. L'un des principaux avantages de CaptivErgo est sa flexibilité dans la gestion des données. La plateforme permet un accès facile aux données brutes et supporte l'import-export de différents types de fichiers, facilitant ainsi le partage et l'analyse des données. Cette caractéristique est particulièrement utile pour les professionnels qui doivent traiter de grandes quantités d'informations de manière efficace.

En termes d'analyse, il offre des capacités d'affichage, de traitement et d'analyse intéressants. Les utilisateurs peuvent examiner les informations recueillies pour des évaluations ergonomiques approfondies, ce qui est essentiel pour identifier et résoudre les problèmes de posture et de mouvement dans les environnements de travail. Les capteurs T-sens Motion de CaptivErgo sont spécialement conçus pour mesurer le mouvement du corps humain. Ces capteurs sans fil sont essentiels pour suivre les mouvements dans diverses situations de travail, en particulier dans les environnements manufacturiers où les mouvements répétitifs et les postures prolongées sont courants.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, ce logiciel présente certains inconvénients. Sa complexité et son coût peuvent être prohibitifs pour les petites entreprises ou les applications

moins intensives. De plus, bien que la plateforme soit relativement utile dans le contexte manufacturier, son application peut être moins directe dans des environnements plus statiques comme le bureau ou d'autres contextes moins axés sur la production. Finalement, CaptivErgo est un outil robuste et polyvalent pour l'analyse ergonomique, offrant aux professionnels une solution complète pour évaluer et améliorer les conditions de travail dans le milieu manufacturier. Sa capacité à intégrer divers types de données le rend particulièrement intéressant pour les environnements complexes, bien que son utilisation puisse être limitée par des considérations pratiques et financières.

En somme, cette étude met en évidence l'importance de l'analyse de l'activité et du facteur humain dans l'évaluation ergonomique, tout en soulignant le potentiel et les défis associés à l'intégration de la technologie dans ce domaine. Elle suggère que l'avenir de l'ergonomie pourrait résider dans une combinaison harmonieuse de méthodes traditionnelles et de solutions technologiques avancées, adaptées aux besoins et contraintes des professionnels du domaine.

2.7 Conclusion

Cette étude souligne plusieurs éléments clés du processus ergonomique, notamment l'importance de l'observation, de la collaboration et surtout de l'analyse de l'activité. Les mesures anthropométriques et l'évaluation de la posture sont également des aspects cruciaux pour une évaluation ergonomique réussie. Par ailleurs, la nuque et le cou se sont révélés être des zones d'intérêt majeur dans le contexte multi-écrans, ce qui suggère que ces régions du corps peuvent être particulièrement vulnérables aux tensions et aux déséquilibres posturaux.

L'étude révèle également une ouverture significative des ergonomes à l'intégration d'outils technologiques dans leur pratique, bien que des préoccupations budgétaires et temporelles demeurent. L'outil envisagé dans cette étude, qui combine visualisation assistée par IA et capteurs physiologiques, a été perçu comme ayant un potentiel significatif pour améliorer le diagnostic ergonomique, notamment dans des contextes de réaménagement ou d'auto-évaluation par les employés.

Ces résultats offrent des perspectives intéressantes pour le développement futur d'outils ergonomiques assistés par la technologie. Ils soulignent également l'importance de prendre en compte les besoins et les contraintes des ergonomes dans la conception de ces outils, afin de maximiser leur utilité et leur adoption dans la pratique professionnelle.

Ainsi, cette étude contribue à une meilleure compréhension des besoins en évaluation ergonomique et ouvre la voie à des innovations technologiques qui pourraient révolutionner la manière dont ces évaluations sont menées.

Bibliographie

Ahuja, K. (2024). Practical and Rich User Digitization. arXiv preprint arXiv:2403.00153v1.

Amick III, B. C., Chaumont Menéndez, C., Bazzani, L., Robertson, M., DeRango, K., Rooney, T., Moore, A. (2012). A field intervention examining the impact of an office ergonomics training and a highly adjustable chair on visual symptoms in a public sector organization, *Applied Ergonomics*, 43(3), 625-631.

Andersen, J.H., Fallentin, N., Thomsen, J. F., Mikkelsen, S. (2011). Risk Factors for Neck and Upper Extremity Disorders among Computers Users and the Effect of Interventions: An Overview of Systematic Reviews. *PLoS ONE*, 6(5): e19691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019691>

Anshel, J. R. (2007). Visual Ergonomics in the Workplace. *AAOHN Journal*, 55(10), 1-4. <https://doi.org/10.1177/216507990705501004>

CaptivErgo (2024). Logiciel. TEA. <https://teaergo.com/captiv/>

Choobineh, A., Motamedzade, M., Kazemi, M., Moghimbeigi, A., Heidari Pahlavian, A. (2011). The impact of ergonomics intervention on psychosocial factors and musculoskeletal symptoms among office workers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(6): 671–676.

Colvin, J., Tobler, N., & Anderson, R. (2004). Productivity and multi-screen computer displays. *Rocky Mountain Communication Review*, 2(1), 31-53.

Digital Europe. (2020). Digital transformation and the future of work: How digital technologies are changing the workforce and workplaces. <https://www.digitaleurope.org/resources/digital-transformation-and-the-future-of-work/>

Dul, J., & Weerdmeester, C. (2001). Ergonomic interventions for office workers with musculoskeletal disorders: A systematic review. ResearchGate.

Fernandez, J. (1995). Ergonomics in the workplace. *Facilities*. 13. 20-27. [10.1108/02632779510083359](https://doi.org/10.1108/02632779510083359).

Griffiths, K. L., Mackey, M. G., Adamson, B. J. (2007). The impact of a computerized work environment on professional occupational groups and behavioural and physiological risk factors for musculoskeletal symptoms: a literature review. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 17:743-765.

- Hignett, S., Wilson, J. R., & Morris, W. (2005). Finding ergonomic solutions—participatory approaches. *Occupational Medicine*, 55(3), 200–207. doi:10.1093/occmed/kqi084
- Hutchings, J. (2022). What Is Ergonomics?. *Ergonomics in the Dental Office*. <https://doi.org/10.1002/9781119365686.ch1>.
- Jacobs, K., & Brown, P. K. (2001). Work-related musculoskeletal disorders in office workers: The role of ergonomic interventions. PubMed
- Jon Peddie Research. (2009, June 1). The multiple display market and consumer attitudes. <https://www.jonpeddie.com>.
- Karsh, B.-T. (Ed.). (2009). Ergonomics and health aspects of work with computers: International conference, EHAWC 2009, held as part of HCI International 2009, San Diego, CA, USA, July 19-24, 2009, proceedings. Springer Berlin Heidelberg.
- Magoc, T., & Magoc, D. (2011). Neural network to identify individuals at health risk. arXiv.
- Mirbabaie, M., Marx, J., Braun, L.-M., & Stieglitz, S. (2020). Digital Detox -- Mitigating Digital Overuse in Times of Remote Work and Social Isolation. arXiv preprint arXiv:2012.09535v1.
- Optimal Workshop (2024). Logiciel. Optimal Workshop LTD. <https://optimalworkshop.com>
- Owens, J. W., Teves, J., et al. (2012). Examination of dual vs. single monitor use during common office tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 1506-1510.
- Owens, J. W., Teves, J., et al. (2012, August 23). Are two monitors better than one? *Software Usability Research Laboratory*, Wichita State University. usabilitynews.org.
- Patel, V., Chesmore, A., Legner, C. M., & Pandey, S. (2022). Trends in workplace wearable technologies and connected-worker solutions for next-generation occupational safety, health, and productivity. arXiv.
- Public Health England (PHE). (2017). Screen time and health: Implications for adults. <https://www.gov.uk/government/publications/screen-time-and-health-implications>
- Robertson, G., Czerwinski, M., et al. (2005). The large-display user experience. *Microsoft Research*. <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2005/01/2005-robertson-cga-largedisplayuserexperiencedraft.pdf>

Richtel, M. (2012). In Data Deluge, Multitaskers Go to Multiscreens. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2012/02/08/technology/for-multitaskers-multiple-monitors-improve-office-efficiency.html>

Santé publique France. (2017). Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban), 2014-2016. *Volet Nutrition. Chapitre Corpulence*.

St-Vincent, M., Montreuil, S., Toulouse, G., & Trudeau, R. (2015). Portrait des pratiques de prévention primaire et secondaire en bureautique au Québec chez les intervenants et dans les milieux de travail. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). *RAPPORT R-874*.

Sigurdsson, S. O., Ring, B. M., Needham, M., Boscoe, J. H., Silverman, K. (2011). Generalization of posture training to computer workstations in an applied setting. *Journal of applied behavior analysis*, 44(1): 157–61.

Klassen, A. (2019). Deconstructing Paper-Lined Cubicles: Digital Literacy and Information Technology Resources in the Workplace. *International Journal of Advanced Corporate Learning*, <https://doi.org/10.3991/ijac.v12i3.11170>

Woo, E. H. C., White, P., & Lai, C. W. K. (2016). Ergonomics standards and guidelines for computer workstation design and the impact on users' health – a review. *Ergonomics*, 59(3), 464–475. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1076528>

Chapitre 3 : Développement et validation d'un outil de visualisation de l'environnement de travail appliquée à l'ergonomie intégrant l'apprentissage machine

Résumé

Ce chapitre décrit le développement et la validation d'un artefact numérique conçu pour améliorer l'évaluation ergonomique des environnements de travail multi-écrans. À travers une méthodologie de « design science » et une approche itérative, cet artefact intègre des données physiologiques et de mouvement pour fournir une analyse quantitative de l'ergonomie des postes de travail. C'est-à-dire que l'artefact combine des données physiologiques et de mouvement dans une visualisation 3D de l'environnement de travail, permettant aux ergonomes d'identifier clairement les zones ou activités potentiellement problématiques. Cette visualisation aide à mieux comprendre l'environnement de travail et peut ainsi faciliter le réaménagement ergonomique des postes. De plus, en intégrant des techniques d'apprentissage machine, l'artefact peut classer de manière efficace les environnements de travail selon leur niveau d'ergonomie, fournissant ainsi une base concrète pour des interventions ciblées.

La phase de développement de l'artefact s'est déroulée en cinq itérations successives, affinant progressivement la fonctionnalité et l'interface de l'outil selon les données d'utilisateurs préliminaires. Ces itérations ont inclus le choix technologique initial, la modélisation fidèle de l'environnement de travail en 3D, l'affichage des données d'orientation de la tête issues de l'accéléromètre, l'intégration et la représentation des données des capteurs, et finalement, l'ajout de l'analyse de l'activité et de la posture. Chaque itération a ainsi directement contribué à la satisfaction des besoins identifiés, allant de la facilité d'utilisation à l'intégration et la visualisation des données, affirmant la capacité de l'outil à faciliter l'évaluation ergonomique.

La validation de l'artefact s'est appuyée sur une expérimentation impliquant 20 participants exposés à 4 différentes configurations ergonomiques de postes de travail multi-écrans. Les tests ont permis de collecter et d'analyser des données physiologiques pour évaluer comment ces configurations influencent les mouvements de la tête et l'activité musculaire. L'analyse statistique des résultats a non seulement confirmé la capacité de l'artefact à identifier correctement les configurations ergonomiques grâce à l'apprentissage machine, mais a également validé la

pertinence des données observées, renforçant ainsi l'utilité de l'outil pour des évaluations ergonomiques précises.

Introduction

L'évaluation ergonomique est un processus exigeant, à travers lequel l'ergonome analyse l'environnement de travail et la manière dont travail un sujet, car il doit combiner une série de facteurs qualitatifs et quantitatifs afin de fournir des recommandations pour améliorer la qualité de vie du travailleur. L'utilisation croissante de configurations multi-écrans dans les environnements professionnels modernes soulève des questions importantes concernant leur impact sur la santé des travailleurs. Avec l'augmentation du temps passé devant les écrans (Ijmker et al., 2006), les risques associés aux troubles musculosquelettiques (TMS) s'intensifient également (Santé Publique France, 2017). Bien que les avantages des configurations multi-écrans pour la productivité soient bien documentés (Robertson et al., 2005; Jon Peddie Research, 2009) et que leur popularité continue de croître (Fang et al., 2023), il est crucial d'aborder les défis ergonomiques qu'ils présentent. Cette tendance souligne l'importance d'examiner de près les configurations multi-écrans, qui constituent une part significative des postes de travail actuels, et développer de nouveaux outils pour leur analyse, afin de minimiser les risques de troubles musculosquelettiques (TMS) et d'optimiser le bien-être des utilisateurs.

L'ergonome a plusieurs outils à sa disposition, mais très peu propose des fonctionnalités de visualisation de données liés à l'utilisation de l'environnement de travail, l'intégration de capteur(s) ou encore des algorithmes efficaces qui pourraient permettre d'améliorer l'efficacité et la et la précision des interventions ergonomiques. L'objectif de cette étude suivant une méthodologie de "Design Science" (Peppers et al., 2007) est de développer un outil appliqué à l'ergonomie d'environnement de travail à plusieurs écrans, intégrant différents capteurs et fonctionnalités pertinentes. La Design Science, ou Science de la Conception, constitue une approche méthodologique centrée sur la création et l'évaluation d'artéfacts conçus pour répondre à des problèmes spécifiques. En suivant les principes établis par Peppers et al. (2007), cette démarche vise non seulement à générer de nouvelles connaissances à travers la conception et l'usage de ces artéfacts, mais aussi à appliquer ces connaissances dans un but pratique. Elle est essentielle dans notre recherche, car elle permet d'aborder les complexités liées à l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans, en mettant l'accent sur l'impact direct des solutions technologiques sur les utilisateurs et les organisations.

À la suite de la revue de la littérature et des retours obtenus des entrevues avec des professionnels du domaine (voir le chapitre 2 de ce mémoire), plusieurs besoins clés ont été identifiés pour

orienter la conception de notre solution. Les entretiens réalisés ont révélé des besoins pour des solutions flexibles, économiques et complémentaires aux évaluations ergonomiques traditionnelles, capables d'apporter une dimension quantitative à l'analyse de l'activité et de la posture dans les environnements de travail multi-écrans. Ces besoins soulignent l'importance de développer un artéfact numérique qui, tout en étant techniquement viable, s'aligne étroitement avec les pratiques professionnelles des ergonomes et enrichit leur arsenal d'outils d'évaluation. Parmi les besoins qui ressortent à travers l'étude préliminaire, on retrouve :

Flexibilité et coût-efficacité : La solution doit être flexible, capable de s'adapter aux diverses configurations de travail et aux besoins spécifiques des utilisateurs. De plus, elle ne doit pas engendrer des coûts trop élevés ni nécessiter un investissement de temps trop important pour sa mise en œuvre ou son utilisation.

Facilitation du réaménagement : En identifiant les zones et les activités problématiques, la solution devrait faciliter le processus de réaménagement des espaces de travail, en suggérant des ajustements basés sur des données objectives.

Identification et sensibilisation : La solution devrait représenter des mesures objectives qui permettraient d'identifier les activités ou tâches spécifiques qui posent des problèmes du point de vue ergonomique. De plus, en fournissant des preuves tangibles et visuelles, l'outil servirait également de moyen de sensibilisation, voire d'auto-évaluation, aidant à convaincre et à informer les parties prenantes de l'existence de problèmes ergonomiques potentiels.

En somme, cet article détaille la conception et la validation d'un tel outil, conçu pour faciliter le réaménagement des espaces de travail et améliorer le processus d'évaluation ergonomiques, en fournissant des visualisations et des analyses basées sur des données physiologiques précises. Ce développement s'appuie sur les observations recueillies à partir d'entrevue avec des ergonomes et sur la littérature disponible, pour créer une solution qui non seulement répond aux défis identifiés, mais ouvre également de nouvelles perspectives pour l'évaluation et l'amélioration de l'ergonomie des postes de travail multi-écrans. L'ensemble de la démarche sera guidé par les questions de recherche suivantes : Est-il possible d'utiliser la visualisation assistée par IA pour évaluer les environnements de travail à plusieurs écrans? Peut-on classifier l'ergonomie d'un environnement de travail à partir de données physiologiques et de mouvement, à l'aide de l'apprentissage machine ? Le chapitre 3.1 décrira la conception et le développement d'un logiciel suivant les exigences définies à partir du chapitre 2, tandis que le chapitre 3.2 testera la validité du logiciel obtenu en le soumettant à des cas d'utilisation concrets et à l'aide d'analyse statistique rigoureuse.

3.1 Conception et développement

La recherche en ergonomie, en particulier dans le contexte des environnements de travail multi-écrans, nécessite une approche méthodologique rigoureuse et des outils adaptés pour capturer, analyser et interpréter les données. Dans cette optique, la phase de conception et de développement est cruciale. Elle ne se contente pas de créer un simple outil, mais vise à élaborer un artefact capable de répondre aux exigences spécifiques de notre étude, tout en étant suffisamment flexible pour s'adapter à des contextes variés et garantir une certaine évolutivité. Cette section détaille le processus suivi pour concevoir et développer cet artefact, en mettant l'accent sur les choix technologiques effectués, les défis rencontrés et les solutions apportées. De la sélection de la plateforme à la mise en œuvre des algorithmes de visualisation, chaque étape est décrite pour offrir une compréhension complète de la démarche adoptée.

3.1.1 Définition des objectifs de la solution (requis système)

La conception de notre solution est guidée par un ensemble d'exigences clairement définies, émanant directement des besoins exprimés par les ergonomes dans la première étude de ce mémoire. Ces besoins comprennent l'amélioration de la flexibilité et de la rentabilité des outils d'évaluation, la facilitation du réaménagement des espaces de travail grâce à des données objectives, et l'identification précise des zones problématiques pour une meilleure sensibilisation aux enjeux ergonomiques. À partir de ces besoins, l'accent a été mis sur la compatibilité et la portabilité pour assurer une intégration aisée dans divers contextes de recherche. Ces exigences facilitent l'adaptation du logiciel aux besoins évolutifs et aux contraintes spécifiques du domaine de la recherche, mais sont aussi importantes pour sa capacité à être généralisé à d'autres domaines. La modélisation en 3D de l'environnement de travail est aussi une exigence importante, contribuant à l'intuitivité de l'artefact et à la visualisation des interactions entre l'utilisateur et son poste de travail multi-écrans. La prise en compte des données physiologiques, telles que celles issues de l'accéléromètre et de l'électromyographie (EMG), est déterminante pour évaluer l'impact de l'environnement sur son utilisateur de manière quantitative. L'objectif est de fournir une base solide pour l'analyse ergonomique, enrichie par des mesures objectives. Ici, on s'intéresse particulièrement à l'électromyographie, comme mesure de l'activité musculaire (Hamilton-Wright, 2005), et à l'activité électrodermale comme déterminant des émotions, telles que le stress et la colère (Ooi et al., 2018). Face aux contraintes budgétaires et temporelles de l'évaluation ergonomique, le logiciel doit être intuitif et modulaire, permettant une personnalisation et une

exploration efficace des données par les utilisateurs. Cette approche garantit non seulement une utilisation immédiate dans le cadre actuel de la recherche, mais prévoit également l'intégration future de nouvelles sources de données ou fonctionnalités. Une liste des exigences complètes, définies à partir de la revue de littérature et des entrevues dans le chapitre 2, est disponible à travers le tableau 4.

Tableau 4. Exigence système de l'artéfact à développer

Requis	Catégorie	Description
R1	Modélisation de l'environnement	Le système doit charger et afficher l'environnement de travail en 3D.
R2	Modélisation de l'environnement	La représentation 3D de l'environnement de travail doit être fidèle à la réalité.
R3	Intégration et visualisation des données	Le système doit intégrer et afficher des données provenant d'un accéléromètre sous forme de points pour indiquer les orientations de la tête.
R4	Intégration et visualisation des données	Le système doit être capable de calculer la densité des points.
R5	Intégration et visualisation des données	Le système doit intégrer et afficher les données provenant d'un capteur EMG situé sur la nuque.
R6	Intégration et visualisation des données	Le système doit intégrer et afficher les mesures de l'activité électrodermale (EDA).
R7	Intégration et visualisation des données	Le système doit permettre d'inclure ou non les données de chaque tâche
R8	Intégration et visualisation des données	Le système doit utiliser des variations de couleurs et de transparences pour représenter différentes métriques, notamment la densité, l'EDA et l'EMG.
R9	Interactivité et personnalisation	Le système doit fournir des outils, permettant aux utilisateurs de manipuler et d'ajuster la scène 3D.
R10	Interactivité et personnalisation	Le système doit permettre une exploration détaillée des données visualisées.
R11	Compatibilité et portabilité	Le système doit être compatible avec une variété de systèmes et de navigateurs web.
R12	Compatibilité et portabilité	Le système doit être conçu pour être portable et utilisable dans divers environnements et contextes.
R13	Extensibilité et évolutivité	Le système doit être modulaire pour faciliter l'intégration de nouvelles sources de données ou l'ajout de nouvelles fonctionnalités à l'avenir.

En résumé, les exigences de cet artéfact sont conçues pour développer un outil flexible et évolutif, apte à relever les enjeux actuels en ergonomie de bureau tout en offrant une plateforme d'analyse avancée. Cet outil vise non seulement à améliorer l'évaluation ergonomique dans les configurations de travail multi-écrans mais aussi à soutenir des études dans d'autres domaines où l'analyse du mouvement de la tête et la collecte de données physiologiques synchronisées sont cruciales. Son application pourrait s'étendre à des contextes variés, tels que les cockpits d'avions, où la compréhension précise des interactions physiques et des réponses physiologiques est essentielle.

3.1.2 Instrumentation

Afin de faciliter la compréhension des itérations de développement, cette partie vise à introduire les différents outils utilisés dans le développement de l'artéfact numérique et expliquer leur fonctionnement.

3.1.2.1 BlueBox

La BlueBox COBALT (Courtemanche et al., 2022) est un petit boîtier fonctionnant sur Arduino, qui permet l'intégration de capteur externe comme ceux d'ECG, d'EDA ou encore d'EMG, et qui permet l'enregistrement de ces signaux sur une carte SD externe. Les données de signaux simultanés sont enregistrées sur un fichier texte, accompagnées d'un horodatage et sont également synchronisées directement, et cela même si la fréquence d'échantillonnage des signaux est différente. Dans notre cas, le signal d'EMG et de l'EDA ont une fréquence similaire de 100Hz. L'EDA se dispose sur la paume de la main du sujet, une électrode sur le côté pouce et une autre sur le côté du petit doigt. Pour l'EMG, la zone étudiée correspond à la nuque, avec 2 senseurs sur le cervical droit de manière parallèle à la colonne vertébrale (figure 3) et un 3^e senseur sur la partie osseuse derrière l'oreille.

3.1.2.2 Accéléromètre

Dans notre étude, nous utilisons un accéléromètre développé sur une plateforme Arduino (Arduino, 2023), équipé d'une fonctionnalité Wi-Fi pour la transmission des données. Cet accéléromètre mesure les mouvements tridimensionnels et envoie les données capturées en temps réel via Wi-Fi à un socket serveur. Sur un ordinateur connecté à ce même réseau, un script Python (Python Software Foundation, 2024) spécialement conçu, écoute ce socket, capturant les données transmises. Ce script enregistre ensuite les données reçues dans un fichier, permettant une analyse

ultérieure des mouvements enregistrés pendant l'expérience. La figure 2 illustre le placement du boîtier de l'accéléromètre sur la tête d'un participant, fixé par un bandeau élastique.

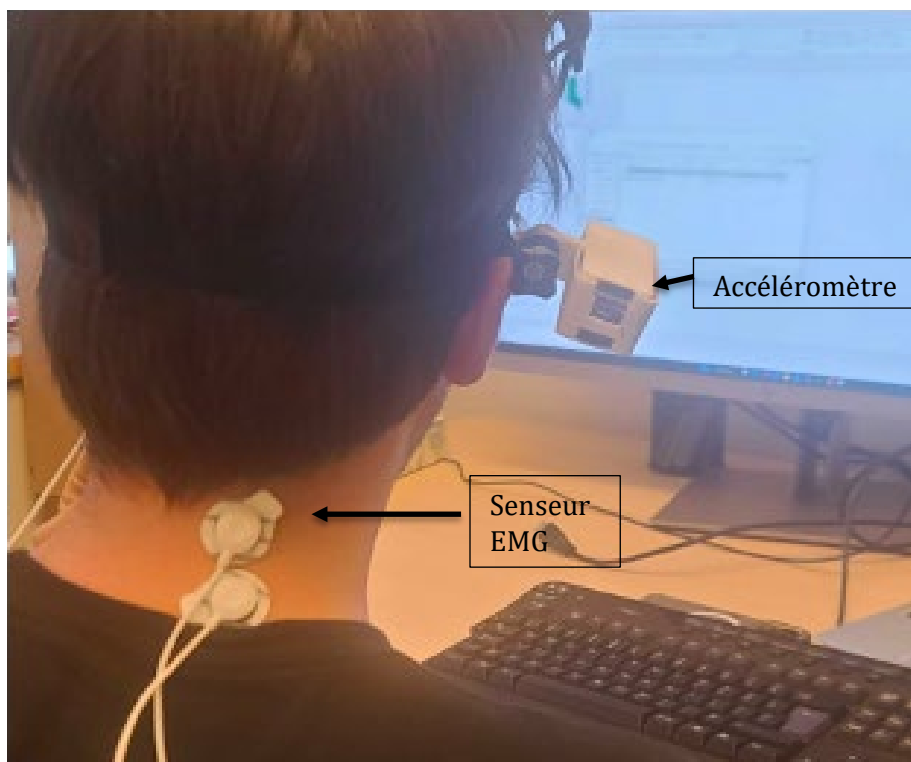


Figure 2. *Accéléromètre placé au niveau de la tête*

3.1.2.3 Actograph

ActoGraph (SymAlgo Technologies, 2023) est un outil logiciel privé conçu pour l'enregistrement, la visualisation et l'analyse de l'activité humaine. Une licence éducative gratuite a été obtenue pour réaliser cette étude. Basé sur un protocole défini en amont, il permet de cataloguer et de quantifier l'ensemble des activités et postures adoptées par une personne observée sur une période donnée. Chaque activité et posture est soigneusement horodatée, avec des indications précises sur le début, la fin et la durée totale de chaque segment. Les données recueillies peuvent être visualisées sous forme de graphiques, offrant une représentation claire des tendances et des schémas d'activité. De plus, ActoGraph offre la possibilité d'exporter ces données sous forme de fichiers CSV, facilitant ainsi leur intégration dans d'autres systèmes ou leur analyse ultérieure.

3.1.3 Conception

La phase de conception est cruciale pour garantir la fluidité du développement et la pertinence de l'artéfact développé. Elle englobe l'ensemble du processus de traitement des données, depuis leur collecte jusqu'à leur intégration dans l'outil. Il est essentiel de comprendre que l'artéfact, dans sa forme actuelle, n'est pas conçu pour traiter directement les signaux bruts d'EDA, d'EMG et de l'accéléromètre. Ces signaux nécessitent une préparation préalable pour être exploitables.

La première étape de ce processus est le formatage des données. Les signaux bruts doivent être transformés en un format qui peut être facilement interprété et analysé par l'artéfact. Cette transformation garantit que les données sont présentées de manière cohérente et significative.

La synchronisation est la prochaine étape cruciale. Étant donné que les données d'EDA, d'EMG et de l'accéléromètre sont collectées simultanément, il est impératif qu'elles soient synchronisées pour garantir une analyse précise. Ces étapes sont gérées en amont grâce à un script Python (Python Software Foundation, 2024) automatisé. Il est important de souligner que, bien que ces étapes soient essentielles à la fonctionnalité de l'artéfact, elles sont distinctes de la problématique utilisateur. Lorsque l'artéfact est en cours d'utilisation, on suppose que les données ont déjà été traitées.

Néanmoins, la collecte des données et sa mise en œuvre sont intrinsèquement liées à l'expérience utilisateur. Des aspects, tels que la portabilité des outils de collecte, deviennent centraux pour garantir une expérience utilisateur optimale. Ces considérations sont illustrées dans la Figure 3, qui décrit le parcours complet des données et les étapes nécessaires pour garantir la fonctionnalité de l'artéfact. On commence donc par le nettoyage et le formatage des différentes sources de données, afin qu'elles puissent être synchronisées ensemble. En parallèle, on prépare l'environnement 3D, c'est-à-dire qu'on scanne l'environnement de travail et on l'importe dans l'artéfact. Finalement, l'artéfact est capable de lire les données synchronisées à partir d'un fichier généré spécifiquement pour son utilisation, affiche les différentes données à travers l'environnement 3D et est capable d'y apporter des modifications en temps réel, comme l'affichage de certaines tâches ou le changement des échelles de couleur.

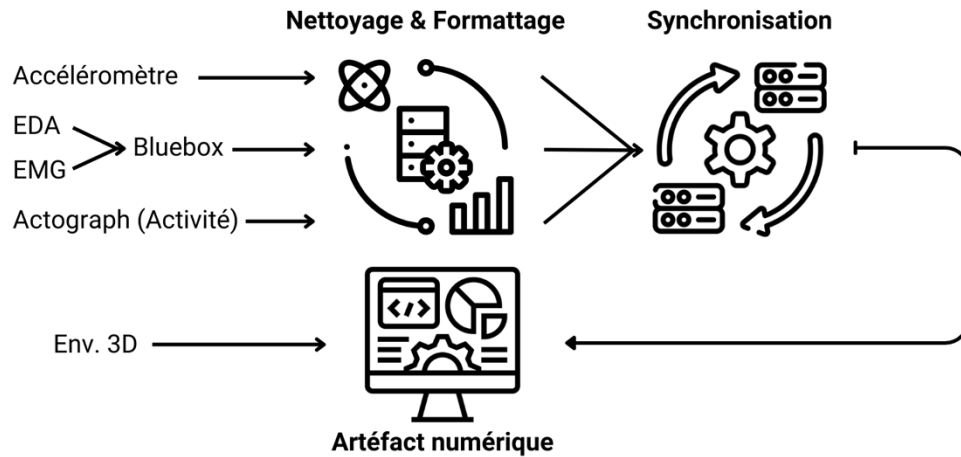


Figure 3. *Processus de traitement et d'intégration des données vers l'artéfact*

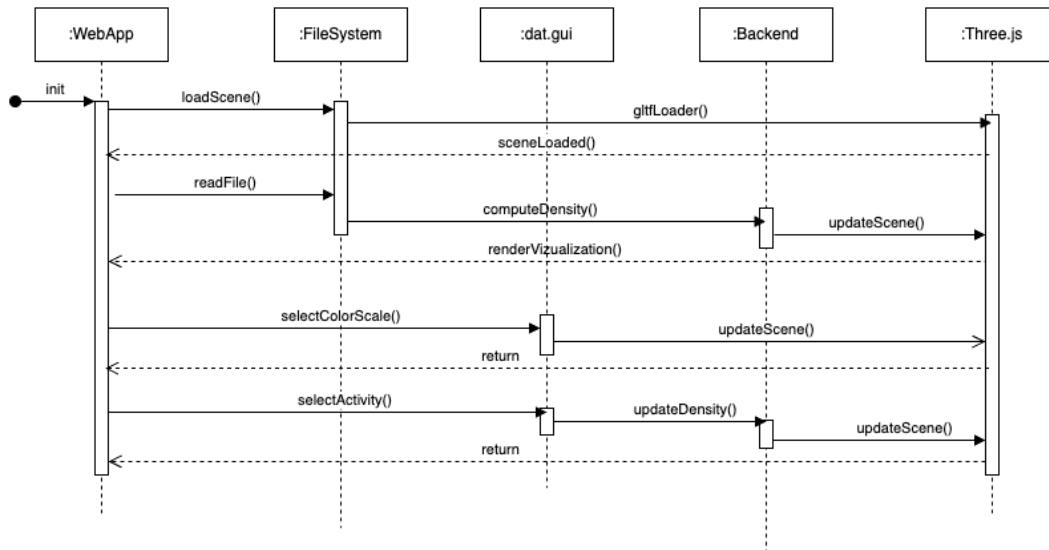


Figure 4. *Diagramme de séquence de l'application*

La figure 4 représente le fonctionnement final de l'application, à un moment où les données ont été déjà formatées, nettoyées et synchronisées. Ce diagramme de séquence illustre le processus interactif entre différents composants de notre application web pour la visualisation de données. Après l'initialisation, l'application charge une scène en lisant un fichier via le système de fichiers. Puis, elle utilise « dat.gui », une bibliothèque pour l'interface utilisateur, et Three.js, une

bibliothèque graphique, pour traiter et afficher les données. Les étapes comprennent le chargement de la scène, le calcul de la densité des données, la sélection de l'échelle de couleurs, et la sélection de l'activité par l'utilisateur, qui déclenchent des mises à jour dans la scène visualisée. Chaque interaction de l'utilisateur avec l'interface provoque une requête au backend, qui à son tour, met à jour la visualisation en temps réel.

L'utilisation de l'artéfact peut se résumer en 3 fonctionnalités principales:

- Visualiser l'environnement 3D et afficher les différentes directions de la tête sous la forme d'un nuage de point.
- Choisir l'échelle de couleur de ces points selon des valeurs de densité, d'EDA ou d'EMG.
- Afficher les points selon les activités sélectionnées qui ont été observées.

La conception de notre solution a posé les fondations nécessaires pour aborder la phase suivante : le développement logiciel de l'artéfact. Forts des observations recueillies et des objectifs clairement définis, nous entamons désormais le processus itératif de développement, où chaque étape nous rapproche d'une solution optimale. Cette phase est cruciale pour transformer notre vision conceptuelle en une application concrète, prête à être testée, évaluée, et affinée en réponse aux retours des utilisateurs et aux exigences du terrain. De plus, dû à la nature exploratoire de cette étude, suivre une approche itérative permet de corriger le tir selon les différentes découvertes qui peuvent être faites à chaque itération.

3.1.4 Itérations de développement

Dans cette section, nous abordons le processus progressif par lequel l'application a été conçue et affinée. Cette approche itérative a permis d'ajuster continuellement les fonctionnalités, l'interface utilisateur et les performances de l'application en réponse aux retours d'essais et à l'analyse des résultats à chaque étape. Les itérations successives ont renforcé la robustesse du produit final, en veillant à ce que chaque composant réponde aux exigences et aux attentes des utilisateurs, tout en permettant une flexibilité suffisante pour intégrer les améliorations nécessaires. Le développement s'est donc déroulé en 5 itérations, présentées dans la figure 5, où chaque étape correspond à un point déterminant dans le développement du logiciel, permettant aussi bien de visualiser en 3D des données physiologiques et de mouvement que d'inclure des déterminants essentiels de l'évaluation ergonomique comme l'analyse de l'activité et de la posture.



Figure 5. Les 5 étapes du développement de l'artéfact numérique

1re itération : Choix technologiques selon les requis systèmes

Lors de la phase initiale de conception, plusieurs solutions ont été envisagées pour la mise en œuvre de ce projet, notamment des moteurs de jeu renommés tels qu'Unreal Engine (Epic Games, 2023) et Unity (Unity Technologies, 2023). Cependant, ces options, bien que permettant facilement d'intégrer une scène 3D, présentaient des défis spécifiques. Leur maintenance pourrait s'avérer complexe à long terme, et leur flexibilité pour des développements futurs était potentiellement limitée. De plus, ces environnements, étant assez lourds, posaient des défis en termes de langage de programmation, de documentation et d'exigences matérielles. La figure 6 présente un prototype réalisé sur Unreal Engine (UE). La modélisation 3D sur UE nécessitait une certaine transformation et un affinage pour obtenir un résultat adéquat, ce qui rendait cette solution peu optimale pour un processus fluide et efficace.



Figure 6. 1er prototype réalisé sur Unreal Engine

Après une évaluation approfondie, une solution basée sur une application web, en utilisant le cadre logiciel Three.js (Cabello, 2023), a été privilégiée pour plusieurs raisons clés :

1. Flexibilité : La plateforme web offre une adaptabilité sans précédent, permettant des ajustements et des extensions faciles en fonction des besoins évolutifs du projet.
2. Simplicité et légèreté : Contrairement à des moteurs de jeu lourds, une application web est plus légère, facilitant ainsi le déploiement et la mise à jour.
3. Portabilité et gestion de version : Avec Nodejs (OpenJS Foundation, 2023) comme seuls prérequis, la portabilité est grandement facilitée. NodeJS et son gestionnaire de paquets, npm, offrent une excellente gestion des paquets et des modules, essentiels pour le développement. Cette gestion par module facilite également l'intégration à un gestionnaire de version comme git, et assure l'accessibilité au code.
4. Accessibilité : Une application web est généralement plus accessible, ne nécessitant pas d'installations lourdes et pouvant être utilisée sur divers appareils et systèmes d'exploitation.
5. Documentation : JavaScript (Mozilla Foundation, 2023), sur lequel repose Three.js, est l'un des langages de programmation les plus utilisés au monde, garantissant une vaste documentation et une grande communauté de soutien.

En conclusion, la décision d'opter pour une application web basée sur Three.js a été prise en considérant les avantages intrinsèques de cette plateforme, en particulier en termes de flexibilité, de portabilité et de documentation.

Three.js est une bibliothèque JavaScript renommée, conçue pour faciliter la création et la visualisation de graphiques 3D dans les navigateurs web sans nécessité de plug-ins externes. S'appuyant sur WebGL (Khronos Group, 2024), standard web dédié au rendu graphique 3D, Three.js offre des visualisations interactives précises. Sa structure intuitive, couplée à une documentation exhaustive, en fait un outil privilégié pour l'intégration des composants 3D dans une interface web.

2^e itération : Modélisation de l'environnement 3D

Une fois l'environnement de développement sélectionné, il était essentiel de s'assurer qu'il répondait aux exigences du système, notamment la capacité de modéliser un environnement 3D et d'y apporter des modifications basées sur des fichiers de données ou des données provenant d'un serveur. Pour la modélisation de cet environnement 3D, nous avons opté pour l'iPhone 14

Pro, équipé d'un capteur LiDAR. Le LiDAR, ou "Light Detection and Ranging", fonctionne en émettant des impulsions laser vers une cible et en mesurant le temps que met la lumière à revenir au capteur. Cette mesure permet de déterminer la distance entre le capteur et la cible, permettant ainsi de cartographier précisément l'environnement en trois dimensions.

En utilisant l'application Polycam (Polycam, 2023), nous avons pu réaliser un scan détaillé de la pièce ou du bureau en question. L'avantage de ce scan est qu'il peut être exporté au format gltf (.glb). Le format gltf est particulièrement avantageux, car il est conçu pour une transmission efficace et un chargement rapide, tout en conservant une qualité de rendu élevée. De plus, étant un format ouvert, il assure une interopérabilité entre différentes applications et plateformes.

Grâce à Three.js, nous avons pu charger ces fichiers gltf en utilisant le GLTFLoader (Three.js, 2023). Pour offrir une plus grande flexibilité dans la manipulation et l'ajustement de la scène 3D, nous avons intégré dat.gui, une bibliothèque légère pour la création d'interfaces utilisateur graphiques. Dat.gui (Google Data Arts Team, 2023) permet aux utilisateurs de déplacer, de redimensionner et d'ajuster divers paramètres de la scène en temps réel, offrant ainsi une expérience utilisateur intuitive et interactive.

3^e Itération : Lire et afficher les données de l'accéléromètre.

L'accéléromètre est un dispositif électronique capable de mesurer l'accélération d'un objet ou corps auquel il est fixé. Fondamentalement, il mesure les variations de vitesse dans le temps. Dans le contexte de ce projet, l'accéléromètre a été conçu à l'aide d'une plateforme Arduino (Arduino, 2023), une plateforme de prototypage électronique open source qui permet de créer des dispositifs électroniques interactifs.

La particularité majeure de cet accéléromètre réside dans sa capacité à se connecter sans fil grâce à une puce Wifi intégrée. Une fois connecté à un réseau, il émet en continu les vecteurs d'accélération qu'il détecte sur un socket dédié. Ces vecteurs sont ensuite capturés par un script Python, conçu pour deux fonctions principales, la visualisation en temps réel des données (essentiel pour vérifier le bon fonctionnement de l'appareil lors de phases comme la collecte) et l'enregistrement de ces données dans un fichier texte pour une analyse ultérieure.

Pour garantir la synchronisation et la précision des données, chaque vecteur d'accélération est accompagné d'un horodatage et des valeurs de tangage (pitch) et de lacet (yaw). La cadence d'enregistrement a été fixée à 200ms, assurant ainsi que chaque nouvelle entrée dans le fichier est précisément espacée de 200ms par rapport à la précédente, offrant une granularité fine pour l'analyse des mouvements. L'horodatage est généré lors de l'activation de l'accéléromètre à l'aide

d'une requête NTP (Network Time Protocol), assurant une source précise et constante pour la donnée temporelle, et le résultat est conservé dans le nom du fichier généré, sous la forme d'une timestamp UNIX.

L'application web, dans sa conception, est conçue pour traiter et visualiser des données à partir de fichiers de données traités en amont. Elle est capable de lire un fichier spécifique, ligne par ligne, où chaque ligne contient des données formatées provenant de l'accéléromètre. Ces données, une fois traitées, sont utilisées pour afficher des points sur une sphère virtuelle.

La représentation de ces points sur une sphère est essentielle pour visualiser les orientations prises par la tête de l'utilisateur au fil du temps. Cette approche de visualisation s'inspire du concept de la sphère "d'orientation" utilisée par Wilson et al. (2016 et 2020), pour l'étude des mouvements de la tête chez les animaux à partir de données d'accélération.

Le terme "Sphère d'orientation", « O-sphère » ou encore tracé sphérique 3D (Wilson et al, 2016; Wilson et al. 2020; Grundy, 2009), est une référence à une technique de visualisation spécifique qui permet de représenter des données dans un espace tridimensionnel, simulant ainsi une vue à 360 degrés. Dans cette technique, les données de lacet (mouvement horizontal) et tangage (mouvement vertical) sont projetées sur une sphère, permettant une compréhension intuitive des orientations et des mouvements. En utilisant cette méthode, il est possible de déduire les directions prises par la tête de l'utilisateur en se basant sur les vecteurs de rotation, offrant ainsi une représentation visuelle claire et compréhensible des mouvements de la tête dans l'espace. La réalisation d'une sphère pour visualiser les orientations de la tête est rendue possible grâce à la bibliothèque Three.js. Cette bibliothèque offre des outils pour dessiner une sphère et y placer des points en fonction de coordonnées spécifiques.

L'accéléromètre fournit des données sous forme de quaternions (w,x,y,z), mais pour notre application, il est plus pertinent d'utiliser les valeurs de lacet (yaw) et de tangage (pitch). Ces valeurs représentent respectivement les mouvements gauche-droite et haut-bas de la tête. L'utilisation de ce couple (lacet, tangage) est avantageuse, car elle simplifie la représentation des vecteurs en une paire, similaire à une coordonnée spatiale (x,y) (Grundy et al. 2009; Wilson et al., 2016).

- Lacet : Il représente la rotation horizontale, c'est-à-dire le mouvement gauche-droite de la tête. En termes de coordonnées, cela affecte principalement les axes X et Z.
- Tangage : Il représente la rotation verticale, soit le mouvement haut-bas de la tête. Cela affecte principalement l'axe Y.

Pour positionner un point sur la sphère en fonction de ces angles, les transformations suivantes sont appliquées :

$$\text{Équation 1 : } X = \cos(\text{pitch}) * \cos(\text{yaw})$$

$$\text{Équation 2 : } Y = \sin(\text{pitch})$$

$$\text{Équation 3 : } Z = \sin(\text{pitch}) * \sin(\text{yaw})$$

L'équation 1 pour x utilise le cosinus du lacet et du tangage. Lorsque le lacet est à 0 (la tête est droite), le cosinus du lacet est 1, ce qui signifie que le point est directement sur l'axe X. À mesure que le lacet change, le point se déplace autour de l'axe Y, créant une rotation horizontale.

L'équation 2 pour y utilise le sinus du tangage. Lorsque la tête est droite (pitch à 0), le sinus est 0, ce qui signifie que le point est au niveau de l'axe horizontal. À mesure que la tête se lève ou s'abaisse, le point monte ou descend le long de l'axe Y.

L'équation 3 pour z utilise le sinus du lacet et le cosinus du tangage. Cela permet de déplacer le point autour de l'axe Y, tout en tenant compte de l'élévation ou de l'abaissement de la tête.

En combinant ces trois formules, nous obtenons une représentation tridimensionnelle des mouvements de la tête sur une sphère. Il est essentiel de convertir les valeurs d'angles de degrés en radians avant d'appliquer ces formules. Ensuite, la position calculée est multipliée par le rayon de la sphère (dans notre cas, un rayon de 1) pour obtenir la projection correcte. Une fois la position du point déterminée, un nouveau point est créé dans Three.js. À ce point, une géométrie et un matériau sont appliqués. Nous avons opté pour un matériau de type PointMaterial, auquel une couleur spécifique est également attribuée pour une meilleure visualisation.

4^e Itération : Calcul de la densité.

La coloration des points est un élément essentiel de la visualisation que nous cherchons à développer, afin d'être intuitive et significative. L'objectif est de nuancer les points en fonction de leur densité relative par rapport aux autres points. Autrement dit, la couleur vise à indiquer les directions que la tête a le plus fréquemment adoptées ou les positions où elle s'est maintenue le plus longtemps.

L'utilisation du couple lacet et tangage sont particulièrement avantageux dans ce contexte, car elle se réduit à deux valeurs, simplifiant ainsi le processus d'affichage. Pour déterminer la densité, nous employons la méthode de l'Estimation de Densité par Noyau Gaussien (KDE - Kernel

Density Estimation). L'Estimation de Densité par Noyau (KDE) est une technique non paramétrique utilisée pour estimer la fonction de densité de probabilité d'une variable aléatoire. Dans notre contexte, elle permet d'estimer la densité des points sur notre sphère. Le noyau gaussien est l'un des noyaux les plus couramment utilisés pour cette méthode. Il a la forme d'une courbe en cloche, similaire à la distribution normale. En superposant ces courbes en cloche (ou "noyaux") sur chaque point de données et en les sommant, nous obtenons une estimation lisse de la densité. Plus la densité est élevée à un endroit donné, plus la valeur de la KDE est élevée à cet endroit. Ces valeurs élevées sont ensuite traduites en couleurs plus intenses ou distinctes sur notre visualisation, indiquant les zones où la tête s'est le plus souvent orientée ou est restée le plus longtemps.

Pour estimer la densité des directions prises par la tête, nous utilisons la méthode KDE de la bibliothèque `scipy.stats` (Virtanen et al., 2020). Cette méthode est implémentée dans une fonction de densité qui est définie dans un backend Flask (Pallets Projects, 2023). Flask est un cadre logiciel web en Python qui permet de développer des applications web rapidement. Dans ce contexte, il sert d'API pour traiter les données envoyées par le frontend, calculer la densité et renvoyer les résultats.

La fonction utilisée commence par extraire les données de la requête « POST », spécifiquement les valeurs de lacet et de tangage. Ces données sont ensuite empilées verticalement pour former un tableau 2D xy. On utilise ensuite la fonction permettant d'estimer la densité du noyau gaussien, à partir de la bibliothèque `scipy.stats`, pour estimer la densité de ces points. La densité est normalisée pour obtenir des valeurs entre 0 et 255, qui sont utilisées pour définir la couleur des points. En cas de succès, la fonction renvoie une liste de ces valeurs colorées. Sinon, elle renvoie une liste vide.

Ce processus intervient lors d'une requête du client vers le backend, ce qui signifie qu'à chaque initialisation, une requête POST, comprenant les données de lacet et de tangage, est envoyée au backend Flask pour calculer la densité de ces points. Cette requête est effectuée en utilisant la bibliothèque `axios` (Axios, 2023), qui est une bibliothèque JavaScript populaire pour effectuer des requêtes HTTP. La figure 7 présente les interactions entre le client et le serveur à ce stade, et les différentes fonctions et arguments invoqués pour calculer la densité.

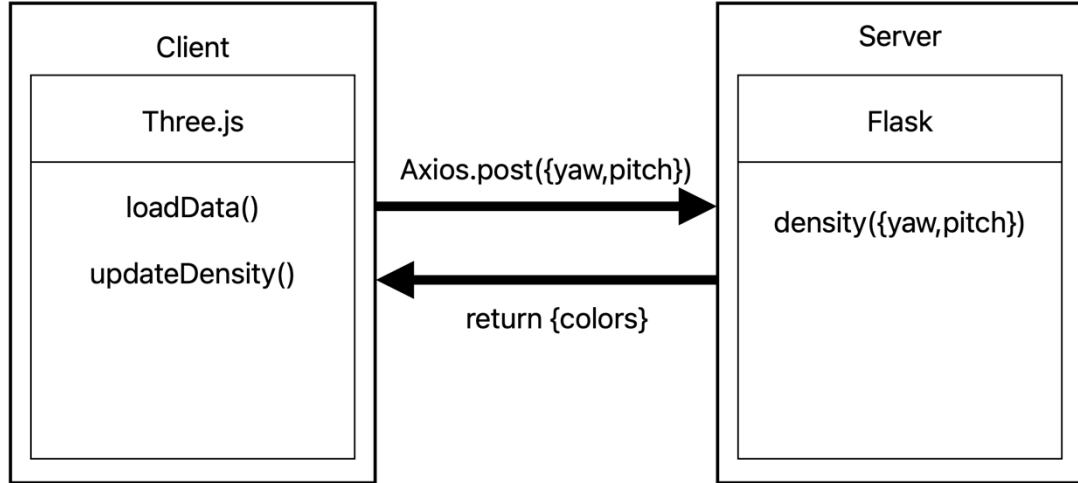


Figure 7. *Architecture client-serveur à l'itération 4*

À la réception des valeurs de densité normalisées du backend, l'application web utilise une fonction pour convertir ces valeurs en une couleur RGB et mettre à jour la couleur des points dans la visualisation Three.js. Cette couleur est déterminée en fonction de la densité : les faibles densités sont représentées en bleu, les densités moyennes en vert, et les hautes densités en rouge.

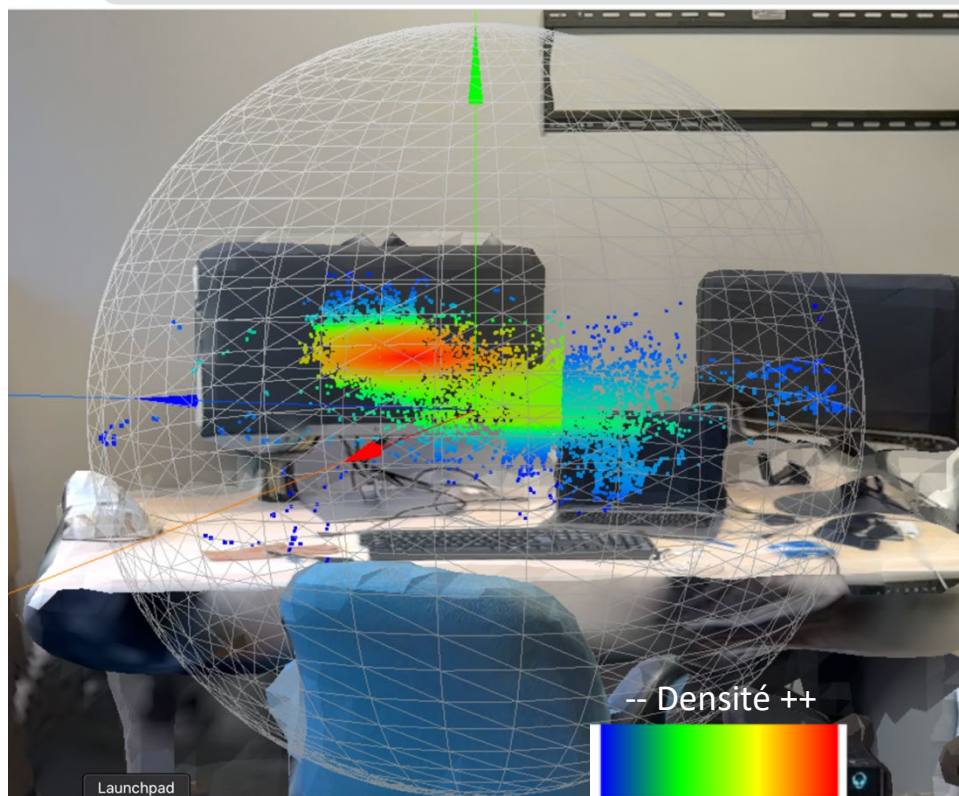


Figure 8. *Sphère d'orientation avec calcul de la densité selon les mouvements de la tête*

La figure 8 illustre une version de l'application à cette itération, mettant en avant la visualisation 3D de l'environnement de travail et la sphère d'orientation (Wilson et al., 2020). Cette visualisation intègre des points représentant les différentes directions prises par la tête du participant sur une période donnée. La couleur des points varie selon la densité, suivant le principe des cartes de chaleur : les zones où la tête a passé le plus de temps sont marquées en rouge, indiquant une concentration plus élevée de mouvements dans ces directions. Si une erreur se produit lors de la requête, elle est simplement affichée dans la console.

En somme, cette approche permet de combiner les capacités de calcul de Python avec la puissance de visualisation de Three.js pour créer une visualisation interactive et informative des directions prises par la tête.

5^e Itération : Inclusion des données d'EMG et d'EDA

Comme mentionné dans la section présentant les outils, nous avons utilisé la BlueBox COBALT (Courtemanche et al., 2022), pour collecter les valeurs d'électromyographie (EMG) et d'activité électrodermale (EDA). Le taux de rafraîchissement de ces 2 signaux synchronisés est

de 100Hz. À partir de l'horodatage qui est généré, et une fois les signaux nettoyés et traités, nous avons ce qu'il nous faut pour les synchroniser avec les données de l'accéléromètre.

La méthode de traitement et d'affichage du signal électromyographique (EMG) diffère de celle du signal de conductance électrodermale (EDA) en raison de la nature intrinsèque des deux types de signaux. Le signal EMG est un signal bioélectrique qui reflète l'activité musculaire et est caractérisé par des fluctuations rapides et des amplitudes variables. Il est généralement plus bruité et sujet à des interférences, nécessitant des techniques de filtrage et de lissage plus avancées pour en extraire des informations utiles (Chowdhury et al., 2013). De plus, l'EMG peut présenter des valeurs négatives et positives, ce qui nécessite une attention particulière lors de la normalisation. En revanche, le signal EDA est plus stable et varie plus lentement, reflétant les changements dans le niveau d'excitation ou de stress du système nerveux autonome (Feng, 2018). Il est généralement non négatif et peut être plus facilement normalisé dans une plage spécifique sans avoir besoin de techniques de filtrage complexes. En raison de ces différences, la méthode de transformation des valeurs EMG en couleurs dans une visualisation nécessite des étapes supplémentaires, définies de la manière suivante, afin d'obtenir une représentation visuelle significative.

Initialement, la filtration est employée pour éliminer le bruit indésirable tout en préservant les composantes fréquentielles du signal. Cette étape utilise un filtre passe-bande qui isole les fréquences situées entre 20 et 500 Hz, typiquement associées aux signaux EMG, permettant ainsi de conserver uniquement les éléments du signal d'intérêt (Chowdhury et al., 2013).

La rectification suit, avec pour objectif de transformer toutes les valeurs négatives du signal en valeurs positives, facilitant l'analyse ultérieure. Cette opération consiste à prendre la valeur absolue de chaque échantillon du signal. Par ailleurs, pour assurer une meilleure précision des données, des limites supérieures et inférieures sont définies afin d'éliminer les valeurs aberrantes. Enfin, le calcul de la valeur moyenne quadratique, ou RMS (Root Mean Square), est appliqué. Cette mesure est cruciale, car elle fournit une estimation de l'amplitude du signal sur une période spécifique, en utilisant une fenêtre glissante. La formule RMS est définie par la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs du signal EMG. Cette mesure RMS offre une appréciation quantitative de l'intensité du signal EMG, reflétant ainsi l'activité musculaire au sein de la fenêtre considérée.

Chaque étape est essentielle pour transformer le signal brut en une forme qui est plus informative et plus facile à analyser (Altimari, 2012).

La synchronisation des données d'EMG et d'EDA, capturées à une fréquence de 100 Hz, avec les données d'accéléromètre, enregistrées à 5 Hz, est réalisée à l'aide d'une requête SQL spécifique à l'aide d'un notebook python (Project Jupyter, 2024). Cette requête associe chaque mesure d'EMG

et d'EDA avec la mesure d'accéléromètre la plus proche dans le temps, en utilisant une fenêtre de 200 millisecondes. Après cette association, les données sont regroupées par l'horodatage de l'accéléromètre et la moyenne des autres mesures est calculée pour chaque groupe. Ce processus aligne les fréquences d'échantillonnage et permet d'obtenir un ensemble de données synchronisées, qui est ensuite enregistré dans un fichier CSV pour être utilisé avec l'artéfact ou pour des analyses ultérieures. Cette méthode assure une synchronisation précise et efficace, cruciale pour l'analyse des interactions entre les mouvements de la tête et les réponses physiologiques.

Une fois les données synchronisées, on obtient un fichier contenant chaque couple de lacet et tangage avec sa valeur d'EMG et d'EDA correspondant. Maintenant il n'y a plus qu'à changer la couleur des points selon l'échelle qu'on décide d'afficher, à savoir, la densité, l'EDA ou l'EMG. Pour convertir une valeur d'EDA en couleur, sur une échelle allant du bleu (faible activation), passant par le vert (activation modérée) au rouge (activation élevée), on utilise le processus suivant : La valeur d'EDA est d'abord normalisée à une échelle de 0 à 1 en fonction des valeurs minimales et maximales d'EDA fournies, à l'aide d'une normalisation linéaire.

$$\text{Équation 4 : } \textit{NormalizedValue} = \frac{\textit{EDAValue} - \textit{EDAMin}}{\textit{EDAMax} - \textit{EDAMin}}$$

Cette valeur normalisée est ensuite utilisée pour déterminer la couleur correspondante. Si la valeur est inférieure à 0,5, elle est interpolée entre le bleu (représentant une faible activation) et le vert (activation modérée). Si elle est supérieure ou égale à 0,5, elle est interpolée entre le vert et le rouge (indiquant une forte activation). Cette cartographie permet une visualisation intuitive de l'activation physiologique, où les variations de couleur reflètent directement les changements dans l'EDA. Enfin, la couleur déterminée est utilisée pour créer un matériau pour un objet Three.js et est retournée pour être assignée au point correspondant.

Pour le signal d'EMG et la conversion de ses valeurs en couleurs, une normalisation linéaire est employée, similaire à celle utilisée pour l'EDA. Toutefois, étant donné la faible variabilité des valeurs d'EMG, une fonction cubique est également appliquée afin d'accentuer le contraste entre ces valeurs. De plus, la transparence est codée en fonction de la valeur normalisée, permettant ainsi une meilleure mise en évidence des clusters ou des zones présentant une activité EMG accrue.

On utilise « dat.gui », introduit dans la 2^e itération de développement, et son menu déroulant, pour pouvoir choisir quelle échelle de couleur doit être appliquée à la visualisation. Les options pouvant être sélectionnées sont donc la densité, l'EDA ou l'EMG et leur sélection applique l'échelle de couleur correspondante. Une démonstration de l'utilisation de « dat.gui » et des différentes échelles disponibles est illustrée à travers la figure 9. Les données représentées dans cette figure proviennent d'une collecte exploratoire visant à obtenir des données pour le développement de l'artéfact. La figure 9 illustre clairement la correspondance entre les données de mouvement de la tête, capturées par l'accéléromètre, et les écrans observés, reflétant fidèlement l'utilisation des écrans. Typiquement, la zone de densité élevée indique l'écran principal, tandis que la zone secondaire représente l'écran additionnel. En analysant les données d'activité électrodermale (EDA) en parallèle avec les mouvements, certaines zones montrent une activité électrodermale accrue, suggérant potentiellement des niveaux de stress ou des réactions émotionnelles (Ooi et al., 2018). La seconde ligne de la figure 9 illustre bien ce phénomène. Quant aux données d'électromyographie (EMG), bien que l'interprétation soit moins directe, l'utilisation de la couleur et de la transparence permet d'identifier des zones d'activité musculaire plus importante.



Figure 9. Affichage de la sphère d'orientation selon les 3 échelles différentes; données issues de la collecte préliminaire dédiée au développement

6^e itération : Inclusion de l'activité et de la posture

L'objectif principal de cette itération est d'intégrer l'analyse de l'activité et de la posture, élément fondamental à l'évaluation ergonomique. Pour ce faire, nous avons utilisé Actograph, un outil permettant de définir des segments temporels spécifiques tels que des postures, des activités ou des observations directes. L'idée c'est de par la suite pouvoir synchroniser ces segments avec les données issues de divers capteurs (accéléromètre, EMG, et EDA). Cette synchronisation permet donc l'association de chaque mesure physiologique à un contexte d'activité détaillé, enrichissant ainsi l'analyse.

Le protocole d'activité et de posture à observer a été soigneusement défini en amont. Chaque catégorie d'observation a été précisément identifiée et activée dans Actograph durant les périodes d'observation, ce qui a permis un enregistrement en temps réel et extrêmement précis des différentes activités et postures observées. Cette méthode a facilité la collecte de données contextualisées, essentielles pour les analyses subséquentes.

À la suite de la collecte, les données ont été compilées dans un fichier Excel contenant tous les horodatages des observations, qui a ensuite été traité et synchronisé avec nos données physiologiques à l'aide d'un script Python développé dans Jupyter Notebook. Cette étape cruciale a assuré la préparation des données pour leur analyse ultérieure dans notre logiciel, garantissant une intégration efficace et sans heurts des différentes sources d'information.

Enfin, l'intégration avec dat.gui a été affinée pour améliorer l'interaction utilisateur avec les données synchronisées. Grâce à cette bibliothèque graphique, déjà introduite dans les itérations précédentes, les utilisateurs peuvent sélectionner spécifiquement les segments d'intérêt pour l'analyse, grâce à des cases à cocher. Cette fonctionnalité a permis une exploration flexible et ciblée des valeurs physiologiques associées à des tâches particulières ou à des ensembles de tâches, renforçant l'utilité pratique de notre outil pour des analyses ergonomiques détaillées.

La figure 10, présente la version finale de notre logiciel, intégrant l'ensemble des apprentissages acquis lors des précédentes itérations et comprenant l'ensemble des requis défini en amont. Ce logiciel permet donc, grâce au panneau de contrôle sur la droite, de sélectionner l'échelle de couleur, de positionner la sphère à une position la plus représentative de la position de l'utilisateur, ainsi que de sélectionner les segments ergonomiques d'intérêt. Dans ce cas-ci, les « conditions » correspondent à des configurations d'écrans différentes et on peut donc choisir d'exclure ou non un certain jeu de données, mais selon le protocole défini sur Actograph, ces segments peuvent correspondre à certaines tâche ou posture, comme « Regarde une vidéo », « Travaille sur Excel »,

etc. À noter que la densité est recalculée à chaque fois selon les segments choisis, pour avoir une visualisation la plus pertinente possible.

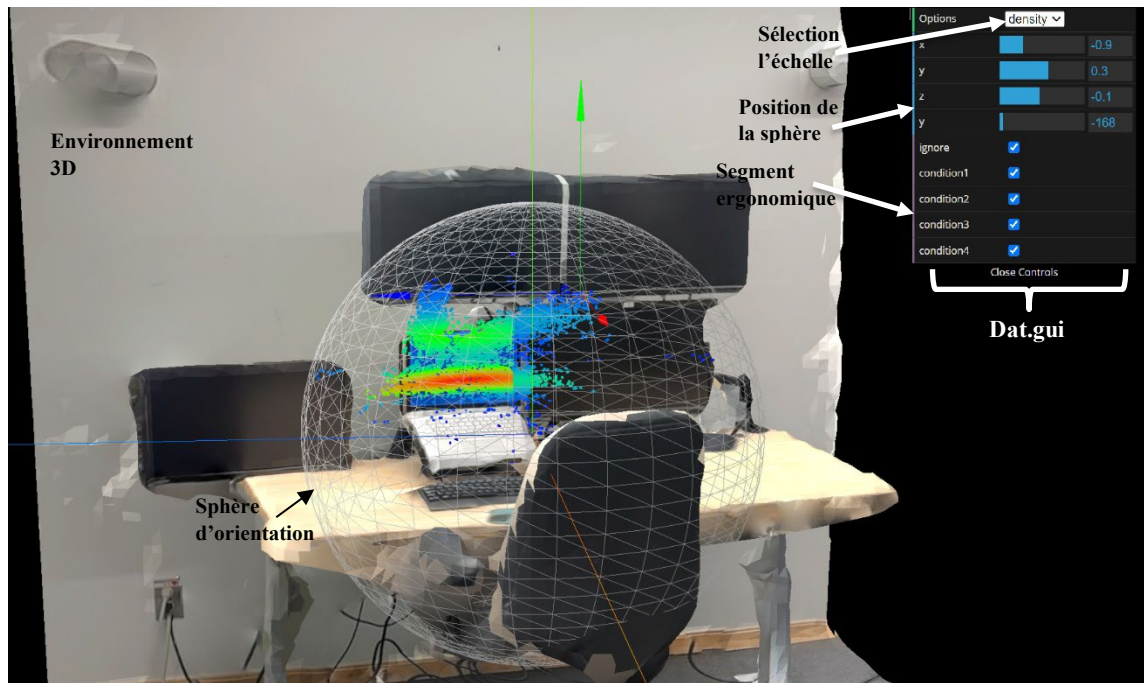


Figure 10. Version finale de l'artéfact développé

La section développement de cet artefact illustre l'achèvement d'un processus itératif conçu pour élaborer un outil numérique adapté à l'évaluation ergonomique des postes de travail multi-écrans. Ce développement s'appuie sur une démarche de design science, combinant méthodologie rigoureuse et innovation technologique pour répondre aux exigences spécifiques de l'ergonomie de bureau. L'outil résultant offre une plateforme pour la visualisation et l'analyse des données physiologiques et de mouvement, reflétant les interactions complexes entre l'utilisateur et son environnement de travail. La modularité et l'évolutivité de l'artefact assurent sa capacité à s'adapter aux besoins futurs de recherche et d'évaluation ergonomique, posant ainsi les fondations pour des améliorations basées sur des données empiriques et des retours d'expérience. Bien que cette phase de développement se soit concentrée sur la création et le test préliminaire de l'outil avec des participants dans un cadre contrôlé, elle ouvre la voie à des investigations plus approfondies sur son application et son efficacité dans des contextes réels.

Dans le chapitre suivant, nous mettrons à l'épreuve l'artefact développé, en évaluant sa capacité à fournir des analyses ergonomiques précises des environnements de travail multi-écrans. Cette phase testera également l'efficacité d'un algorithme d'apprentissage machine pour classer les configurations ergonomiques. L'accent sera mis sur la manière dont l'artefact et l'algorithme peuvent soutenir les ergonomes dans l'identification des configurations optimales et suboptimales,

en se basant sur des données physiologiques et de mouvement synchronisé. Ce chapitre vise à démontrer comment notre solution technologique peut enrichir la pratique ergonomique, en apportant des données quantitatives et des visualisations pour soutenir le processus d'évaluation de poste de travail.

3.2 Validation d'un outil de visualisation assisté par IA

L'objectif de ce chapitre est double : explorer l'ergonomie dans les environnements de travail multi-écrans et valider un logiciel développé pour cette recherche. Il se concentre sur l'impact de diverses configurations d'écrans sur le confort et la productivité des utilisateurs. En utilisant des capteurs EMG et un accéléromètre, cette recherche vise à comprendre l'interaction entre les configurations matérielles et l'ergonomie physique, tout en testant l'efficacité du logiciel dans le suivi et l'analyse de ces interactions. Dans cette section, le terme « configuration ergonomique » désigne les différents paramètres qui composent un environnement de travail, tel que le positionnement et l'orientation des écrans, le choix du mobilier, et l'agencement des périphériques. Ces configurations sont évaluées en fonction de leur conformité aux principes ergonomiques reconnus, qui visent à adapter l'environnement de travail aux caractéristiques physiques et aux besoins des utilisateurs. L'objectif de recherche est d'évaluer la capacité de l'artéfact à classifier ces différentes configurations grâce aux données de mouvement. L'étude examine comment diverses configurations, allant de celles optimisées à celles moins optimales du point de vue ergonomique (aussi désigné par suboptimalité ergonomique), impactent les mesures physiologiques et les mouvements des utilisateurs, afin de fournir des données quantitatives pour l'évaluation de l'ergonomie des postes de travail multi-écrans.

3.2.1 Développement des hypothèses

Dans le cadre de cette recherche, l'évaluation porte sur quatre hypothèses clés. La première, H1, suggère une augmentation de l'activité musculaire en relation avec le degré de suboptimalité ergonomique dans les configurations de travail.

H1 - L'activité musculaire augmente avec la suboptimalité ergonomique.

Selon cette hypothèse, plus une configuration s'éloigne des valeurs ergonomiques recommandées en termes d'angles de vue avec le second écran, plus l'activité musculaire enregistrée par l'EMG est susceptible d'être élevée, indiquant une configuration moins optimale (Szeto & Sham, 2008). L'analyse prévue se concentrera sur l'appréciation des variations de l'activité musculaire en fonction des différents agencements ergonomiques. La deuxième hypothèse, H2, porte sur la

variabilité des mouvements de la tête, mesurés par un accéléromètre, postulant que celle-ci s'accroît avec la suboptimalité ergonomique (Viriyasiripong et al., 2016).

H2 - La variabilité des mouvements de la tête augmente avec la suboptimalité ergonomique

L'accent sera mis sur la manière dont les différentes configurations ergonomiques influencent les mouvements de la tête.

La troisième hypothèse, H3, explore la relation potentielle entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête, indépendamment de la configuration ergonomique. Il s'agira de déterminer si une corrélation existe entre les données d'accéléromètre et les signaux EMG, envisageant ainsi la possibilité que les mouvements de la tête influencent l'activité musculaire.

H3 - Il existe un lien entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête

Enfin, la quatrième hypothèse, H4, cherche à vérifier s'il est possible de classifier les configurations ergonomiques à l'aide de données physiologiques. Cette hypothèse vise à démontrer que les données recueillies via l'accéléromètre, potentiellement enrichies par les données EMG, peuvent être exploitées pour développer un algorithme d'apprentissage machine qui aurait la capacité de différencier efficacement les diverses configurations ergonomiques (Viriyasiripong et al., 2016). L'utilisation de l'apprentissage machine pour classifier ces conditions est justifiée par sa capacité à traiter de grandes quantités de données et à identifier des patterns complexes qui échappent aux méthodes traditionnelles. En intégrant des sources de données variées, comme les accéléromètres et les capteurs EMG, l'apprentissage machine peut fournir une analyse plus complète et précise des mouvements et des postures (Patel et al., 2022; Magoc & Magoc, 2011). De plus, un autre avantage de l'utilisation de l'apprentissage machine est la possibilité d'ajouter continuellement de nouvelles données d'entraînement pour optimiser les évaluations ergonomiques et les interventions.

H4 - Il est possible de classifier différentes configurations ergonomiques à partir de données physiologiques.

L'attention sera donc portée sur la mise au point et la validation de cette méthode de classification.

3.2.2 Méthodologie

La validation de cette étude a été conçue comme une expérimentation quantitative, avec pour objectif principal d'établir un lien entre les mouvements de la tête, les données physiologiques, et le niveau d'ergonomie des postes de travail multi-écrans. Cette démarche a permis de tester la pertinence des observations générées par l'artefact numérique développé, en vérifiant si les configurations ergonomiques influencent effectivement les indicateurs mesurés.

3.2.2.1 Participants

L'étude a inclus 20 participants, jugé suffisants pour une étude exploratoire (Daniel, 2012), et tous droitier. La moyenne d'âge des participants est de 28 ans avec 45% de femme et 55% d'homme, représentant une population active typique susceptible d'utiliser des configurations multi-écrans dans un cadre professionnel. Les participants ont été sélectionnés sur la base de leur capacité à lire et à écrire en français et de leur utilisation régulière d'au moins deux écrans, 1 fois par semaine, garantissant ainsi une pertinence directe avec le sujet de l'étude. Le recrutement a été effectué à partir d'un panel de recrutement du campus de l'école. Le tableau 5, ci-dessous, résume brièvement les caractéristiques de l'échantillon des participants.

Tableau 5. *Sommaire des participants de la phase de validation*

	<i>Récapitulatif</i>
<i>Nombre de participants</i>	20
<i>Âge moyen</i>	28 (18 à 53)
<i>Pourcentage hommes</i>	55%
<i>Pourcentage femmes</i>	45%
<i>Pourcentage droitier(e)</i>	100%
Nombre de participants valides	16

Pour qu'une session de collecte soit considérée comme valide, il était nécessaire que les outils de collecte fonctionnent correctement du début à la fin et que le participant respecte les instructions du protocole, telles que dictées par le modérateur. Les données issues de sessions où ces conditions n'étaient pas remplies ont été considérées comme non valides et exclues de l'analyse. Dans notre étude, les exclusions, représentant 4 personnes, étaient principalement dues à des défaillances techniques des capteurs, telles que leur arrêt inopiné durant la collecte. Ce projet a également reçu l'approbation du comité d'éthique de HEC Montréal (CER), qui a examiné et validé le formulaire de consentement, le message de sollicitation et le protocole (numéro de référence : 2023-5389). Le protocole complet est disponible en annexe B pour consultation.

3.2.2.2 Instrumentation

Accéléromètre : Un dispositif développé avec Arduino (Arduino, 2024), conçu pour mesurer précisément les mouvements de la tête des participants.

BlueBox COBALT: Un capteur EMG utilisé pour enregistrer l'activité musculaire, fournissant des données sur la tension musculaire (Courtemanche et al., 2022).

ActoGraph : Dans le cadre de la validation expérimentale, Actograph (SymAlgo Technologies, 2021) est utilisé pour définir et synchroniser les différents segments ergonomiques avec chaque signal. Cette utilisation diffère de celle dans l'artéfact développé, où Actograph permet une synchronisation spécifique de l'activité et de la posture. La synchronisation se base toutefois sur l'expertise et le processus développés dans la phase de développement.

3.2.2.3 Configuration

Dans l'expérimentation de cette étude, la configuration de l'environnement de travail multi-écrans a été conçue avec une attention particulière pour assurer la précision et la pertinence des configurations testées. Chaque écran est positionné pour créer des conditions ergonomiques variées, allant de l'optimal au sous-optimal. L'écran principal, un ordinateur portable mesurant 22 cm x 31 cm, est placé de manière à ce que le haut de l'écran soit à 20 degrés en dessous de la ligne des yeux du participant. Cette position est recommandée pour une utilisation optimale d'un écran, car elle permet une direction des yeux naturellement légèrement vers le bas, réduisant la tension sur le cou et les yeux (Woo et al., 2016; Human Factors and Ergonomics Society, 2017). Autour de cet ordinateur portable, trois autres écrans sont disposés, mesurant tous les 3, 51cm x 30cm. Ces écrans sont tous alignés sur le même plan vertical, garantissant une uniformité dans l'angle d'inclinaison. Ce choix de conception vise à isoler les variables étudiées, en l'occurrence la position verticale et horizontale des écrans par rapport à l'utilisateur, sans introduire de variation dans l'angle d'inclinaison. Pour la configuration optimale (C3), un écran est positionné de sorte que son centre soit à 20 degrés au-dessus de la ligne des yeux du participant, et à 30 degrés sur le côté droit par rapport à la ligne centrale du buste. Cette configuration est considérée comme optimale en se basant sur des études ergonomiques (Woo et al, 2016) qui suggèrent que garder les écrans dans une certaine gamme de hauteur et d'angles horizontaux peut réduire la fatigue oculaire et la tension musculaire.

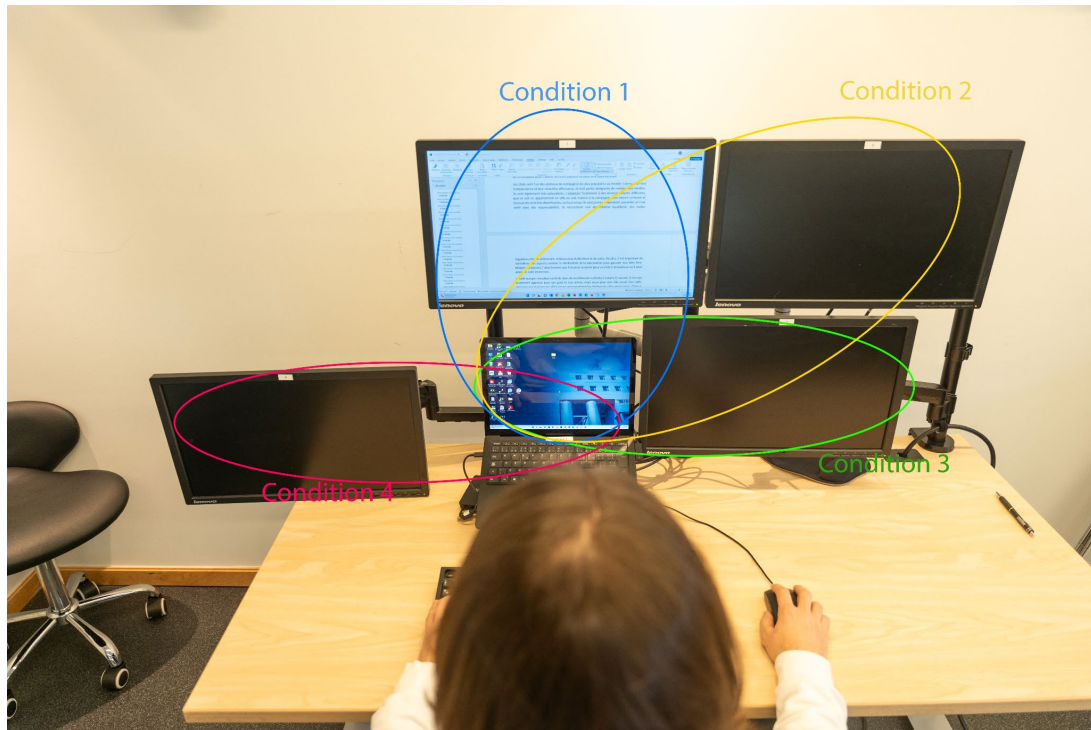


Figure 11. Couple d'écrans représentant chaque condition

Les configurations sous-optimales varient cette position de manière systématique :

Sous-optimal 1 (C1): L'écran est positionné, 5 degrés au-dessus de la ligne des yeux et est aligné verticalement avec l'écran principal, soit 25 degrés de plus que les 20 degrés verticaux recommandés, et 30 degrés de moins en angle horizontal (aligné à 0 degré).

Sous-optimal 2 (C2): Positionné 5 degrés au-dessus de la ligne des yeux, mais cette fois à 36 degrés sur le côté droit. Étant donné que l'on recommande habituellement un maximum de 30 degrés à partir de la ligne du buste (Woo et al., 2016), cette configuration est donc pire que C1, avec 25 degrés de plus verticalement et 6 degrés de plus à droite.

Sous-optimal 3 (C4): Placé à 27 degrés en dessous de la ligne des yeux et à 40 degrés sur le côté gauche. Cette configuration dépasse les 25 degrés verticaux maximum recommandés, et les 30 degrés horizontaux maximum (Human Factors and Ergonomics Society, 2007)

En résumé, on obtient : $C3 > C1 > C2 > C4$

Ces configurations sont illustrées à travers la figure 11, 12 et 13. Elles ont été établies et classifiées en s'appuyant sur des références de la littérature ergonomique. Cette approche méthodique assure que chaque configuration testée offre des données significatives pour évaluer l'impact ergonomique des environnements de travail multi-écrans.

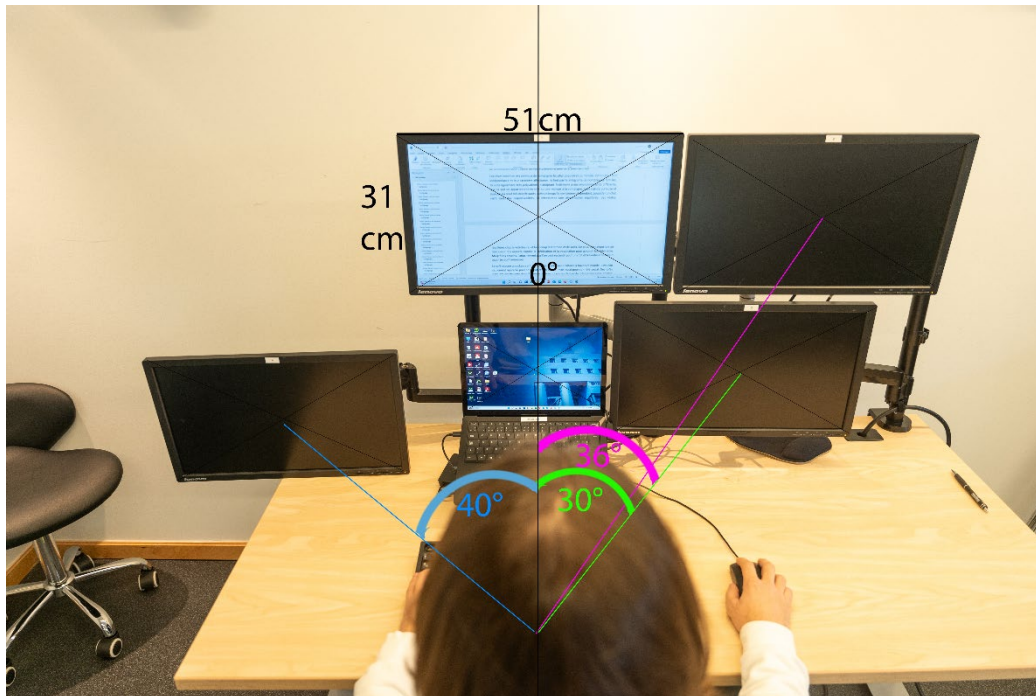


Figure 12. Angles horizontaux pour chaque configuration : C1 en noir, C2 en mauve, C3 en vert et C4 en bleu



Figure 13. Angles verticaux pour chaque configuration : C1 en jaune, C2 en mauve, C3 en vert et C4 en bleu

L'ajustement précis des configurations dans cette étude a été réalisé grâce à l'utilisation d'un bureau ajustable, permettant d'atteindre une distance optimale de 51 cm entre les yeux des participants et la surface du bureau. En complément, la position de la chaise a été ajustée pour chaque participant afin de garantir une distance idéale de 70 cm entre les yeux et l'écran (figure 12). Cette approche méthodique a permis de standardiser l'environnement de test tout en l'adaptant à la morphologie de chaque individu, assurant ainsi une pertinence et une constance maximales dans l'évaluation de l'ergonomie des configurations d'écran.

3.2.2.4 Déroulement

La phase expérimentale de l'étude, illustrée dans la figure 14, a été soigneusement conçue pour évaluer l'ergonomie des configurations d'écrans multi-écrans.

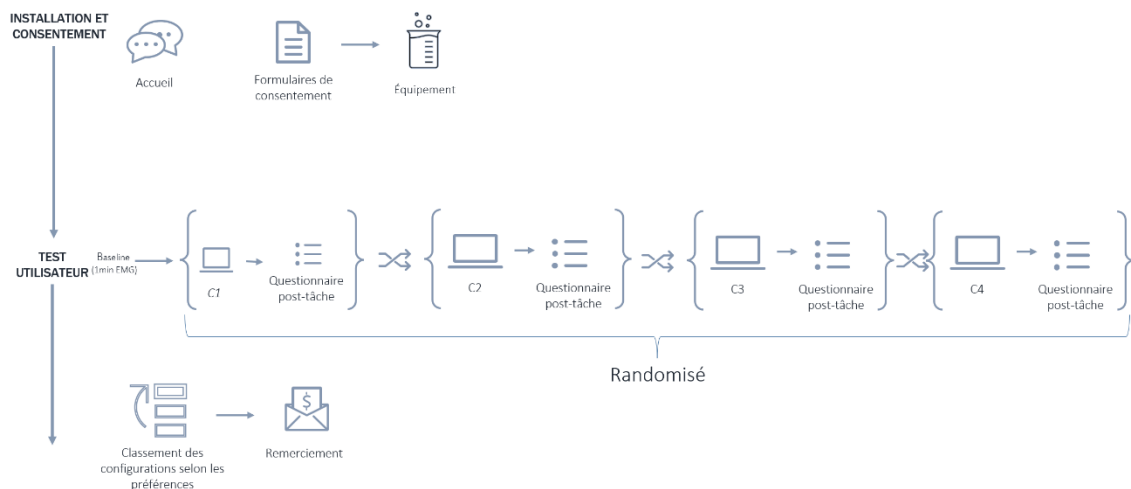


Figure 14. Déroulement de l'expérience de validation

Les participants, une fois arrivés, sont invités à s'installer à leur poste de travail. Ils sont ensuite équipés des capteurs EMG et de l'accéléromètre, qui sont démarrés simultanément pour enregistrer les données de manière synchronisée. Avant le début de l'expérience, un soin particulier est apporté à l'ajustement du poste de travail pour chaque participant. Cela implique l'utilisation d'un bureau ajustable, réglé pour garantir une distance optimale de 51 cm entre les yeux du participant et la surface du bureau. La chaise est également ajustée pour chaque participant, assurant une distance idéale de 70 cm entre les yeux et l'écran, tel que montré dans la figure 12. Cette personnalisation garantit que les conditions de test respectent les normes ergonomiques et sont adaptées à la morphologie de chaque individu, fournissant ainsi un environnement de travail standardisé tout en étant personnalisé pour chaque participant. Ensuite, chaque participant est

requis de signer un formulaire de consentement. Ce document détaille les objectifs de l'étude, les procédures impliquées, ainsi que les mesures prises pour garantir la confidentialité et la sécurité des données personnelles. Il informe également les participants de leur droit de se retirer de l'étude à tout moment sans aucune conséquence. En guise de reconnaissance pour leur participation et le temps consacré, une compensation de 20 dollars est offerte à chaque participant à la fin de l'expérience. L'expérience se décompose en quatre segments de 10 minutes, chacun correspondant à une configuration d'écran différente. Pendant chaque segment, les participants doivent comparer deux textes quasi identiques, affichés sur deux écrans distincts, et surligner sur Word les différences trouvées sur l'écran du laptop. Après chaque segment, le modérateur modifie la configuration de l'écran secondaire et demande aux participants de remplir un questionnaire NASA-TLX ainsi que noter le confort sur une échelle pour évaluer leur expérience. Le questionnaire Qualtrics est disponible en annexe. Le nombre de mots surlignés est également noté pour chaque segment. Un dispositif nommé Actograph est utilisé pour le suivi des segments et la synchronisation des données entre l'EMG et l'accéléromètre. À la conclusion du dernier segment, en plus du NASA-TLX, les participants sont invités à classer les différentes configurations testées selon leur préférence. L'ordre dans lequel les configurations sont testées est randomisé pour chaque participant, afin d'éliminer tout biais potentiel.

Cette méthodologie détaillée garantit une collecte de données complète et fiable, essentielle pour évaluer l'impact des différentes configurations d'écrans sur l'ergonomie et le confort des utilisateurs.

3.2.2.5. Traitement des données et synchronisation

Dans le cadre de cette étude, une attention particulière a été accordée au traitement et à l'analyse des données recueillies, avec pour objectif principal d'analyser les interactions entre les mouvements de la tête, l'activité musculaire et les différentes conditions ergonomiques des postes de travail multi-écrans.

Le traitement du signal électromyographique (EMG) s'est déroulé en plusieurs étapes essentielles pour assurer l'extraction précise et fiable des informations pertinentes. Initialement, un filtre passe-haut a été appliqué au signal EMG, avec une fréquence de coupure fixée à 20 Hz. Cette étape cruciale avait pour but d'éliminer efficacement le bruit de fond et les interférences de basse fréquence, tout en conservant les composantes significatives du signal.

Dans un second temps, la valeur RMS (Moyenne quadratique) a été calculée pour chaque segment du signal EMG. Cette approche a permis de quantifier de manière fiable l'effort musculaire moyen

sur des périodes définies, offrant ainsi une mesure significative et robuste de l'activité musculaire dans le contexte des postes de travail multi-écrans.

La synchronisation des données issues de l'accéléromètre et de l'EMG a constitué une étape fondamentale de notre analyse. Cette procédure s'est appuyée sur l'expérience acquise lors de l'itération 6 du développement de l'artéfact numérique. Dans cette itération, nous avons développé une méthode efficace pour faire correspondre des segments d'activité spécifique avec les données d'EMG et d'accéléromètre. Dans le contexte de l'expérience de validation, ces segments d'activité correspondent aux différentes conditions ergonomiques testées. En utilisant les marques temporelles fournies par Actograph, nous avons pu aligner avec précision les données de mouvement de la tête avec l'activité musculaire enregistrée pour chaque condition ergonomique. Cette synchronisation a été cruciale pour assurer une correspondance exacte entre les mouvements physiques et les réponses musculaires, permettant ainsi une analyse approfondie et fiable des interactions entre les conditions ergonomiques et les réponses physiologiques.

3.2.2.6 Méthode d'analyse des données

Cette section de la méthodologie détaille les approches statistiques et analytiques utilisées pour traiter et interpréter les données recueillies lors de l'expérimentation. L'objectif est d'examiner les interactions entre les mouvements de la tête, l'activité musculaire et les conditions ergonomiques dans les postes de travail multi-écrans.

Les statistiques descriptives ont été calculées pour les données d'accéléromètre, fournissant une vue d'ensemble des tendances générales des mouvements de la tête. Une inspection visuelle des signaux (lacet, tangage, et EMG) pour chaque segment a été réalisée pour assurer la qualité et la cohérence des données.

Des modèles linéaires mixtes ont été employés pour évaluer l'impact des différentes conditions ergonomiques sur l'amplitude de l'EMG (H1) représenté par la moyenne quadratique (RMS). Les conditions ergonomiques ont été considérées comme variables fixes, et les participants comme variables aléatoires pour tenir compte de la variabilité interindividuelle. On avait donc un score pour chaque condition ergonomique comme variable indépendante et la moyenne quadratique de l'EMG comme variable dépendante. Le modèle utilise 64 observations; 4 conditions x 16 participants.

Pour vérifier l'hypothèse 2, la moyenne de la distance euclidienne a été choisie comme indicateur principal des mouvements de la tête. Cette mesure fournit une estimation globale de l'amplitude et de la fréquence des mouvements de la tête dans l'espace. Une analyse ANOVA de Type III a été utilisée pour examiner l'effet global des conditions ergonomiques sur la moyenne de la distance

euclidienne. Des tests par paire post-hoc, ajustés par la méthode de Holm, ont été appliqués pour des comparaisons spécifiques entre les conditions.

Pour examiner la relation entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête dans différents contextes ergonomiques (H3), une régression linéaire mixte a été utilisée. Cette approche statistique a permis d'explorer la corrélation entre les valeurs de la moyenne quadratique de l'EMG (variable dépendante) et la moyenne de la distance euclidienne calculée à partir des données d'accéléromètre (variable indépendante). L'objectif était de déterminer dans quelle mesure les variations de l'activité musculaire peuvent être prédites par les mouvements de la tête sous diverses conditions ergonomiques.

Cette méthodologie d'analyse des données vise à fournir une compréhension approfondie des dynamiques entre l'activité musculaire, les mouvements de la tête et les conditions ergonomiques, à évaluer la pertinence du logiciel développé et constitue un travail préparatoire essentiel pour le développement d'un algorithme d'apprentissage automatique. Cet algorithme a pour but de classer les conditions ergonomiques à partir des données d'accéléromètre et en évaluant les « pattern » de mouvement, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et optimisation des environnements de travail multi-écrans.

Dans le cadre de cette étude, deux modèles de classification, Random Forest Classifier et Gradient Boosting Classifier (Pedregosa et al., 2011), ont été développés pour distinguer les différentes conditions ergonomiques à partir des caractéristiques extraites des données d'accéléromètre et de l'EMG. Ces modèles ont été optimisés et validés à travers une procédure de validation croisée, excluant systématiquement les données d'un participant du jeu d'entraînement pour tester la capacité de généralisation des modèles.

Pour affiner la performance des modèles, une optimisation minutieuse des hyperparamètres a été réalisée en deux étapes. Initialement, RandomSearchCV (Pedregosa et al., 2011) a été utilisé pour définir une grille de paramètres de base. Cette méthode permet une exploration rapide et moins exhaustive des hyperparamètres, offrant une première approximation des meilleurs paramètres pour les modèles. Ensuite, GridSearchCV (Pedregosa et al., 2011) a été employé pour affiner davantage les hyperparamètres. Cette technique effectue une recherche exhaustive sur une grille spécifiée de valeurs d'hyperparamètres, évaluant et comparant les performances de chaque combinaison à travers une validation croisée. Cette approche systématique permet de déterminer la meilleure combinaison d'hyperparamètres pour un modèle donné, améliorant ainsi sa précision et son efficacité.

En plus de l'optimisation des hyperparamètres, un nombre conséquent de caractéristiques (features) statistiques a été testé avec chaque modèle. Différentes combinaisons de ces

caractéristiques ont été expérimentées pour identifier celles qui offrent les meilleures performances, combinant données statistiques du lacet et du tangage, de manière individuelle (moyenne, médiane, etc.) ou combinée (distance euclidienne). La matrice de corrélation qui a servi à cette réflexion est disponible dans l'annexe B. Le but ici était d'évaluer l'ensemble des caractéristiques statistiques et leur effet sur le score ergonomique, tout en évitant de choisir des caractéristiques trop fortement corrélées, au risque de fausser le modèle. Cette démarche méthodique a permis d'évaluer l'impact de chaque caractéristique sur la précision du modèle et de sélectionner les combinaisons les plus efficaces pour la classification des conditions ergonomiques. Cette approche vise à fournir une analyse complète et nuancée des données, permettant de tirer des conclusions sur les interactions entre les mouvements de la tête, l'activité musculaire et les conditions ergonomiques dans les postes de travail multi-écrans.

3.2.3 Résultats

Cette section présente les résultats obtenus à partir de l'analyse des données collectées lors de notre étude. Notre objectif principal était d'examiner l'impact des configurations ergonomiques sur l'activité musculaire et les mouvements de la tête, en utilisant des mesures d'accéléromètre et des signaux EMG, afin de valider les observations issues de l'artéfact numérique et vérifier nos hypothèses.

- H1 - *L'activité musculaire augmente avec la suboptimalité ergonomique.*
- H2 - *La variabilité des mouvements de la tête augmente avec la suboptimalité ergonomique.*
- H3 - *Il existe un lien entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête.*
- H4 - *Il est possible de classifier différentes configurations ergonomiques à partir de données physiologiques.*

Les résultats obtenus, présentés ci-dessous, ont été analysés à travers diverses méthodes statistiques et modèles d'apprentissage machine, fournissant des indices précieux sur les relations entre les données d'accéléromètre, les signaux EMG et les conditions ergonomiques étudiées dans le but de vérifier les hypothèses.

3.2.3.1 Résultat du questionnaire

Avant de rentrer plus en détail dans les résultats et la confirmation ou non des hypothèses, il convient de s'intéresser au questionnaire qui était à remplir par les participants pendant cette étude et de voir quelles sont les observations qui en découlent. Pour rappel, ils étaient invités à

compléter un questionnaire sur Qualtrics durant la session, évaluant leur niveau de confort pour chaque configuration via une échelle spécifique, leur charge de travail et performance perçue à l'aide du NASA-TLX, et enfin, leurs préférences par un classement. La performance était également mesurée par le nombre de différences identifiées entre deux textes, permettant de classer les configurations en fonction de leur efficacité relative, sans comparer le nombre absolu de mots identifiés par configuration. Les résultats détaillés du questionnaire sont disponibles en annexe B, et la figure 15 en offre un résumé. De manière quelque peu surprenante, la configuration 2 se révèle être la plus performante, suivie des configurations 1 et 3. En termes de confort et de préférence, les résultats sont cohérents, avec une préférence marquée pour la configuration 3, puis la 1, et enfin les configurations 2 et 4. Quant aux résultats du NASA-TLX, la configuration 3 arrive en tête, suivie de la configuration 2, puis de la 3, la configuration 4 se classant systématiquement en dernière position selon ces critères.

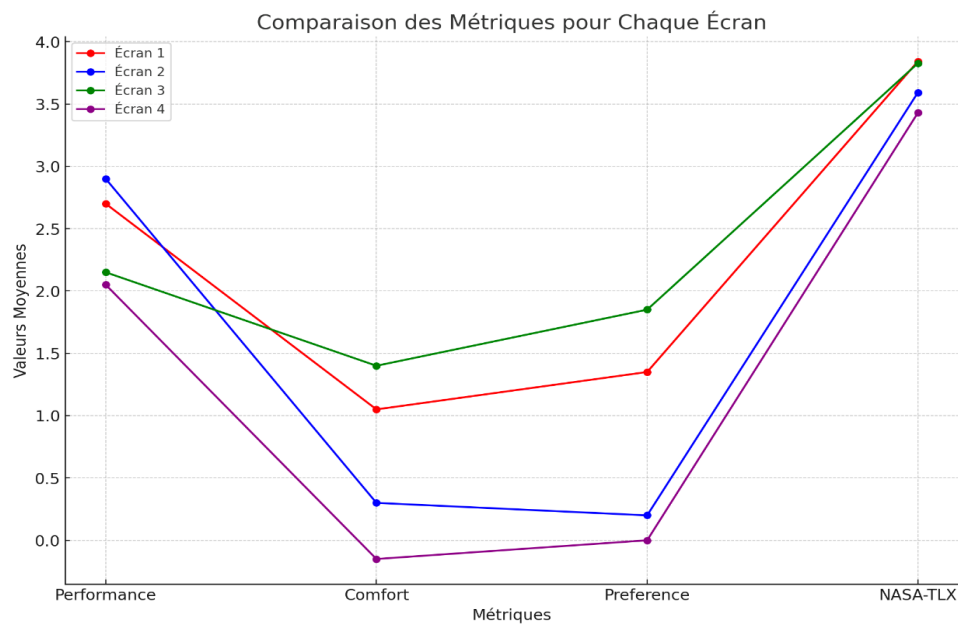


Figure 15. Comparaison de différentes métriques pour chaque configuration

Dans la section méthodologie, les configurations ergonomiques ont été classées selon l'ordre 3 > 1 > 2 > 4. La discussion ultérieure approfondira les implications de ces résultats et leur signification pour notre approche méthodologique, mais les premières observations semblent soutenir notre démarche méthodologique et le classement ergonomique qui avait été fait.

3.2.3.2 Analyse descriptive et inspection visuelle

Dans cette section de notre étude, nous avons exploré les variations de l'activité musculaire, mesurée par l'EMG et traitée par la moyenne quadratique, à travers différentes conditions ergonomiques. Le tableau 6 résume les statistiques descriptives pour chaque condition, incluant le nombre d'observations, la moyenne, l'écart-type, ainsi que les valeurs minimales et maximales (min et max), et les percentiles 25%, 50%, et 75%. Ces données fournissent un aperçu quantitatif des niveaux d'activité musculaire sous chaque condition ergonomique, mettant en lumière des variations subtiles qui pourraient suggérer des différences dans l'ergonomie des configurations de travail. On peut ainsi constater que la condition enregistre des niveaux d'activité musculaire légèrement plus faible que la condition 3, 4 et 2 dans cet ordre. Ces différences sont légèrement plus importantes dans le percentile de 75%. L'écart type soutient le même constat.

Tableau 6. *Statistiques descriptives d'EMG pour chaque configuration ergonomique*

Condition	Compte	Moyenne	Écart-Type	Min	25 %	50 %	75 %	Max
Condition 1	861983.0	3.23	1.54	1.40	2.16	2.80	4.13	6.76
Condition 2	856918.0	3.75	1.96	1.33	2.05	2.85	5.54	6.80
Condition 3	840231.0	3.62	1.64	1.27	2.26	3.29	4.84	6.75
Condition 4	842489.0	3.70	1.71	1.66	2.09	2.58	5.31	6.71

Ces données sont illustrées dans la figure 16, montrant les valeurs d'EMG par condition pour chaque participant, facilitant une comparaison visuelle des impacts potentiels des différentes configurations ergonomiques sur l'activité musculaire. On peut ainsi observer les différents motifs propres à chaque configuration. Cette analyse descriptive est cruciale pour comprendre les tendances générales, assurer la validité des données et sert de prélude à des analyses statistiques plus rigoureuses qui examineront ces différences de manière plus formelle.

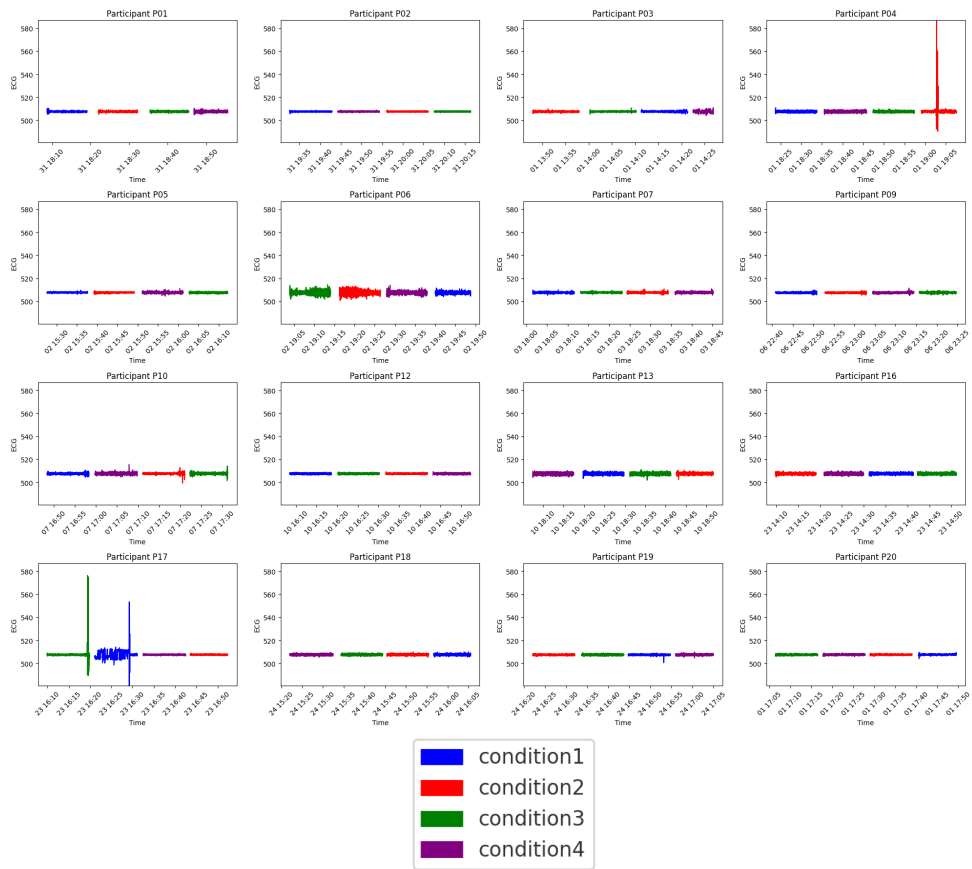


Figure 16. *Activité musculaire (mesurée par EMG RMS) par participant et condition ergonomique*

Tableau 7. *Statistiques descriptives du mouvement de la tête verticale par condition*

Statistique	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Compte	42285	41981	41763	40256
Moyenne	-0.17	-0.23	-8.65	-9.70
Écart-type	6.39	6.25	6.14	7.84
Min	-21.99	-32.55	-30.12	-32.18
25%	-4.34	-4.50	-11.66	-13.75
50%	-0.75	-0.11	-7.69	-9.11
75%	4.58	4.69	-4.78	-3.86
Max	19.30	21.57	8.61	26.09
Gamme	41.30	54.12	38.73	58.27
IQR	8.92	9.19	6.88	9.88
Variance	40.89	39.04	37.73	61.45
Asymétrie	-0.17	-0.20	-0.96	-0.60
Kurtosis	-0.08	-0.57	1.01	0.38

Dans l'analyse des mouvements de la tête verticale, mesurés par le tangage, notre étude a révélé des variations significatives entre les différentes conditions ergonomiques. Voici un résumé des statistiques descriptives compris dans le tableau 7, pour le tangage sous chaque condition :

- Condition 1 présente une moyenne proche de zéro (-0.167), suggérant des mouvements de tête relativement neutres en termes de basculement avant ou arrière. La variabilité (écart-type de 6.39) et la gamme de mouvement (range de 41.30) indiquent une diversité dans les comportements de basculement de la tête parmi les participants.
- Condition 2 montre une légère baisse de la moyenne (-0.234), avec une variabilité similaire à la Condition 1. Cette condition révèle une augmentation de la gamme de mouvement (range de 54.12), ce qui pourrait refléter une adaptation des utilisateurs à une configuration ergonomique moins optimale.
- Condition 3 et Condition 4 montrent des moyennes nettement plus négatives (-8.65 et -9.70 respectivement), indiquant une inclinaison plus prononcée de la tête vers le bas. La

condition 4 révèle également une augmentation de la variabilité et de la gamme de mouvement, où la gamme atteint 58.28, suggérant une plus grande amplitude de mouvement de la tête. Au contraire, la gamme de la condition 3 est la plus faible parmi les 4 conditions, avec 38.73.

Ces motifs sont également visibles à travers la figure 17, du tangage en fonction du temps, par condition. On applique un filtre passe-haut de 0,5Hz pour la dérive de fréquence.

L'analyse du tangage révèle donc des différences notables dans les comportements de basculement de la tête entre les conditions, ce qui pourrait indiquer l'influence de la configuration ergonomique sur la posture de la tête. Ces relations seront d'autant plus étudiées dans l'analyse statistique.

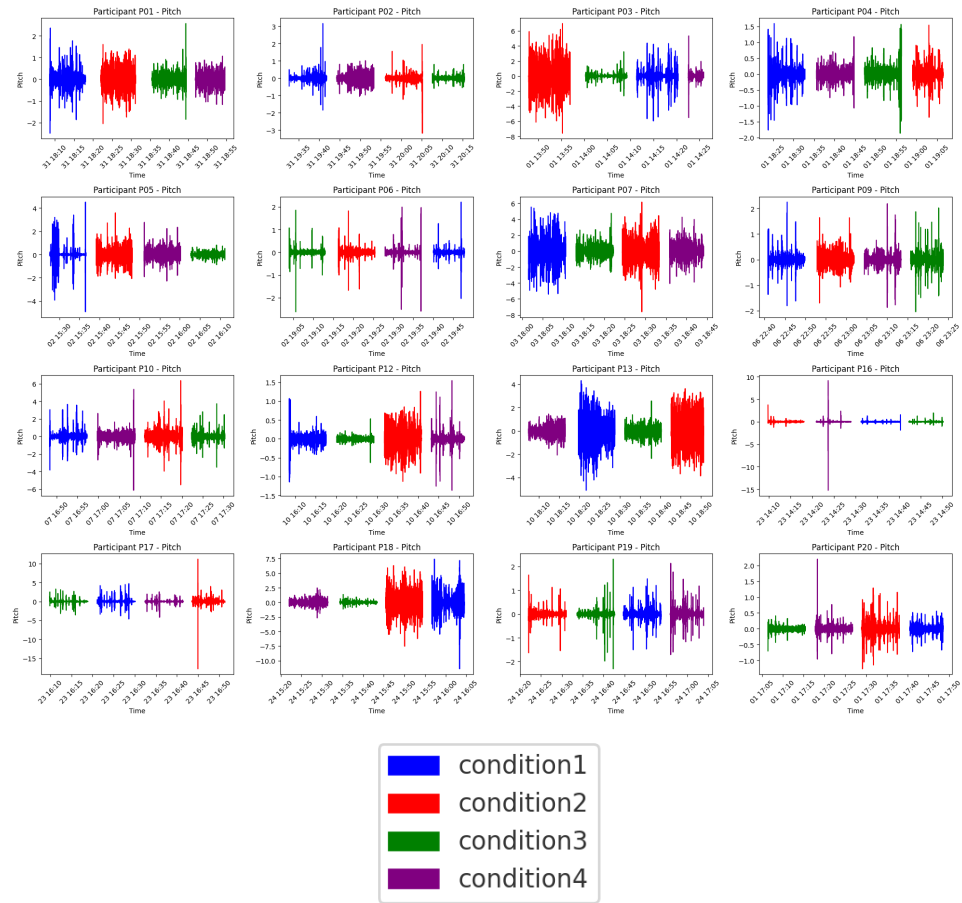


Figure 17. Tangage de la tête en fonction du temps, par participant et condition

Tableau 8. *Statistiques descriptives pour le mouvement horizontal (lacet) de la tête, par condition*

Statistique	Condition 1	Condition 2	Condition 3	Condition 4
Compte	42285	41981	41763	40256
Moyenne	187.51	199.98	196.40	172.80
Écart-type	11.75	13.06	11.69	11.41
Min	167.17	142.40	164.90	139.56
25%	179.26	189.81	187.71	164.64
50%	182.47	199.77	195.93	172.45
75%	193.43	208.33	204.32	183.21
Max	216.82	240.42	234.42	252.62
Gamme	49.65	98.02	69.53	113.05
IQR	14.17	18.52	16.61	18.56
Variance	138.18	170.61	136.69	130.16
Asymétrie	1.00	0.24	0.06	-0.19
Kurtosis	-0.15	-0.35	-0.52	-0.55

Pour l'analyse du lacet (yaw), à travers le tableau 8, les statistiques descriptives révèlent des différences notables entre les conditions, suggérant une variation dans la direction de la tête liée à la configuration ergonomique du poste de travail. Voici quelques observations :

- Condition 1 : Avec une moyenne de 187.52, cette condition montre une orientation de la tête relativement centrée, avec une variabilité modérée (écart-type de 11.75). La gamme de mouvement (49.65) indique une certaine flexibilité dans l'orientation de la tête sans excès de mouvement latéral.
- Condition 2 : Présente une moyenne plus élevée (199.98), suggérant que les participants se tournent davantage vers la droite. La gamme de mouvement la plus large (98.02) et l'IQR élevé (18.52) reflètent une variabilité significative dans les orientations de la tête, ce qui peut indiquer une recherche de confort ou une adaptation à une configuration moins optimale.
- Condition 3 : Affiche une moyenne de 196.40, indiquant une orientation légèrement vers la droite, similaire à la Condition 2, mais avec une variabilité moindre (gamme de 69.53).

Cela pourrait suggérer une certaine stabilité dans l'orientation de la tête malgré la nécessité de s'ajuster à différents écrans.

- Condition 4 : Montre la moyenne la plus basse (172.80), indiquant que les participants ont tendance à se tourner vers la gauche. La gamme de mouvement extrêmement large (113.05) et l'IQR (18.56) suggèrent une variabilité importante dans l'orientation de la tête, ce qui pourrait refléter une adaptation à une configuration ergonomique suboptimale ou une recherche active de la meilleure vue.

La figure 18 présentant les mouvements horizontaux de la tête semble appuyer ces observations. En effet, on peut voir la grande variabilité des conditions 2 et 4 par rapport aux 2 autres, suggérant des configurations ergonomiques moins optimales. Cette figure permet aussi d'avoir un aperçu global des conditions, et permet de s'assurer que les données sont correctes et qu'il n'y a pas de jeu de données hors-norme ou un problème autre.

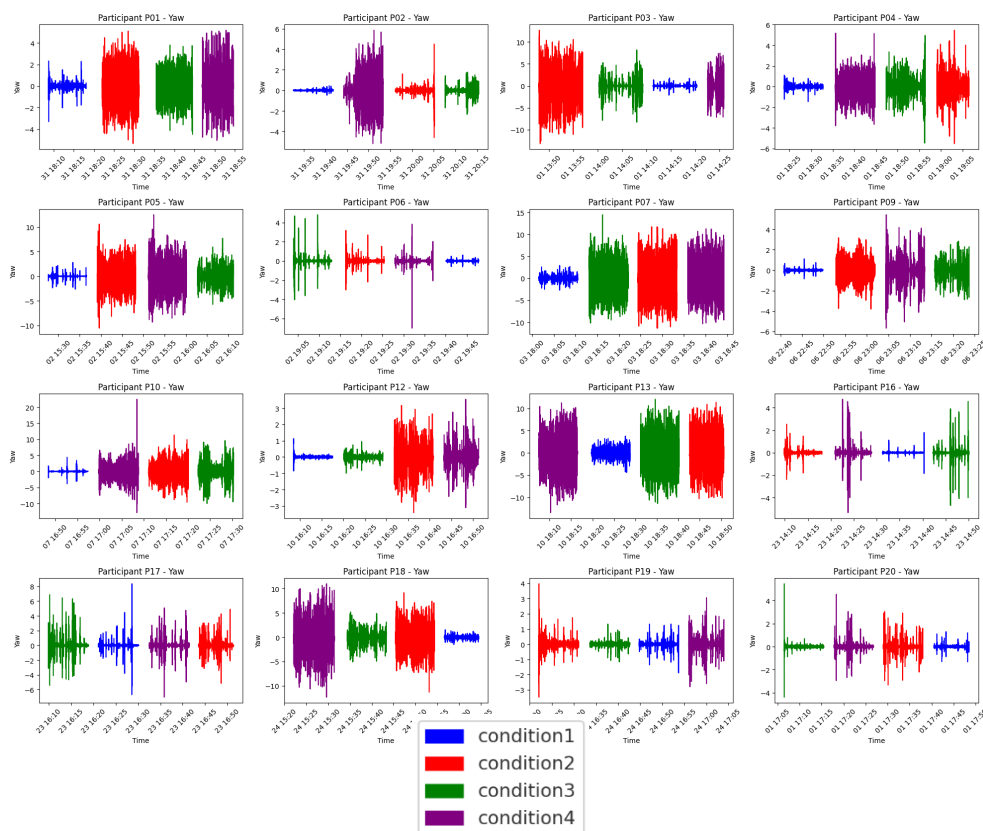


Figure 18. *Mouvement horizontal de la tête en fonction du temps, par participant et condition*

Ces observations suggèrent que les configurations ergonomiques influencent significativement l'orientation de la tête des utilisateurs, avec des implications potentielles sur le confort et la fatigue.

Les conditions 2 et 4, avec leur variabilité élevée, soulèvent des questions sur leur impact ergonomique.

À partir de ces jeux de données, on est aussi capable de représenter les mouvements de la tête en 2D, à travers la figure 19. Cette figure présente la dispersion des points, pour chaque condition, fusionnant tous les participants et représenté par le lacet en x et le tangage en y. Cela correspond à une projection en 2D des positions prises par la tête lors des différents segments ergonomiques. Cette visualisation semble soutenir les résultats présentés dans la section précédente. C'est-à-dire que la condition 2 semble produire des mouvements de tête plus dispersés, autant verticalement qu'horizontalement. La condition 1 est celle présentant le moins de dispersion, et varie surtout sur l'axe vertical. La condition 3 est un peu plus équilibrée dans les 2 axes et est à peu près centrée, alors que la condition 4 se concentre surtout sur la gauche et légèrement plus vers le bas que les autres. Ces observations semblent tout à fait cohérentes avec le positionnement des écrans dans chaque configuration ergonomique, suggérant ainsi que les données de mouvement, telles que celles fournies par l'accéléromètre, peuvent offrir des indications pertinentes sur l'ergonomie d'un poste de travail.

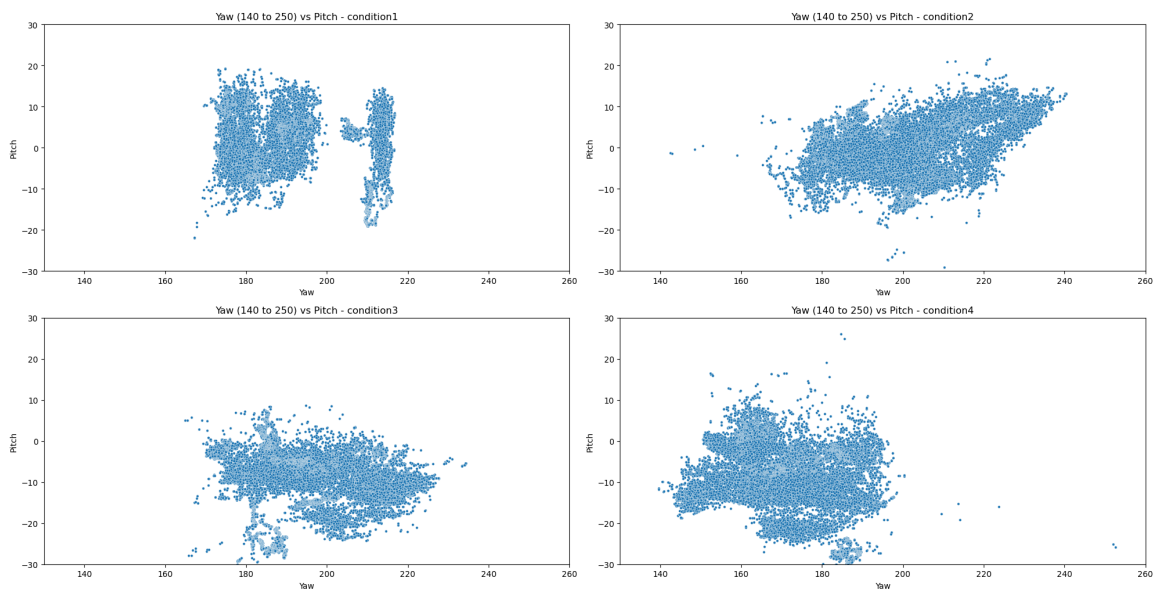


Figure 19. Projection 2D (lacet, tangage) des directions de la tête prises par les participants pour chaque segment ergonomique.

3.2.3.3 Analyse statistique

3.2.3.3.1 Impact des conditions ergonomiques sur l'activité musculaire

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'analyse statistique visant à évaluer l'impact des conditions ergonomiques sur l'activité musculaire, mesurée par l'amplitude RMS de l'EMG. L'analyse s'appuie sur un modèle linéaire mixte présenté dans le tableau 9, prenant en compte les variations interindividuelles et les répétitions des mesures pour chaque participant. L'objectif à travers cette sous-section est de vérifier l'hypothèse 1 qui suppose que le niveau ergonomique diminue avec l'augmentation de l'activité musculaire.

Les résultats du modèle linéaire mixte révèlent les coefficients suivants pour l'effet des scores ergonomiques sur l'amplitude de la moyenne quadratique de l'EMG :

- Intercept (T1.0 = condition 3) : 3.503 (Erreur standard : 0.469, $z = 7.474$, $p < 0.0001$), indiquant la valeur de base de l'EMG RMS dans la condition ergonomique de référence.
- Condition 1 (T1.0) : Coefficient de -0.428 (Erreur standard : 0.302, $z = 1.418$, $p = 0.156$), suggérant une diminution de l'activité musculaire par rapport à la condition de référence, bien que cette diminution ne soit pas statistiquement significative.
- Condition 2 (T3.0) : Coefficient de 0.508 (Erreur standard : 0.302, $z = 1.682$, $p = 0.093$), indiquant une tendance à une activité musculaire plus élevée, qui n'atteint cependant pas le seuil de signification statistique.
- Condition 4 (T4.0) : Coefficient de 0.505 (Erreur standard : 0.302, $z = 1.673$, $p = 0.094$), montrant une augmentation similaire de l'activité musculaire, sans atteindre la significativité statistique.

Tableau 9. *Modèle linéaire mixte de l'effet des conditions ergonomiques (score ergonomique) sur l'activité musculaire (RMS_EMG)*

Model	MixedLM	Variable dépendante			RMS_EMG	
Nombre d'observations	64	Méthode			REML	
Nombre de groupes	16	Échelle			0.7289	
Plus petite taille de groupe	4	Log-Likelihood			-102.123	
Plus grande taille de groupe	4	Converge			Oui	
Moyenne de taille de groupe	4					
	Coef.	Err. Type	z	P > z	[0.025	0.975]
Intercept	3.931	0.469	8.387	0.000	3.013	4.850
C(Score_ergonomique)[T.2]	-0.428	0.302	-1.418	0.156	-1.020	0.164
C(Score_ergonomique)[T.3]	0.080	0.302	0.264	0.791	-0.512	0.671
C(Score_ergonomique)[T.4]	0.077	0.302	0.255	0.798	-0.515	0.669
Variance du groupe	2.786	1.466				

La variance du groupe est estimée à 2.786, avec un écart standard de 1.466, reflétant la variabilité interindividuelle de l'activité musculaire au sein des conditions ergonomiques.

Ces résultats indiquent une tendance à une augmentation de l'activité musculaire avec une ergonomie suboptimale, bien que les différences entre les conditions ergonomiques ne soient pas statistiquement significatives. Les intervalles de confiance et les valeurs p associées aux coefficients suggèrent que, malgré une observation visuelle d'une augmentation de l'activité musculaire, cette relation n'est pas confirmée de manière significative sur le plan statistique. Pour compléter cette analyse, un test de Wilcoxon a également été effectué, confirmant les conclusions du modèle linéaire mixte. Les valeurs p obtenues dans le test de Wilcoxon, présentées dans le tableau 9, appuient l'absence de différences significatives dans l'activité musculaire entre les différentes conditions ergonomiques. La figure 20, représentant un diagramme de dispersion, a également été générée dans le but de confirmer la validité des données. Ici, on voit que les données sont raisonnablement dans le même intervalle et qu'il n'y a pas de valeur limite abusive, ce qui indique que les données sont correctes.

Tableau 10. Résultat du test de Wilcoxon entre chaque condition ergonomique

Paire ergonomique	P-Value
C2 et C3	0.782
C2 et C1	0.175
C2 et C4	0.105
C3 et C1	0.782
C3 et C4	0.298
C1 et C4	0.597

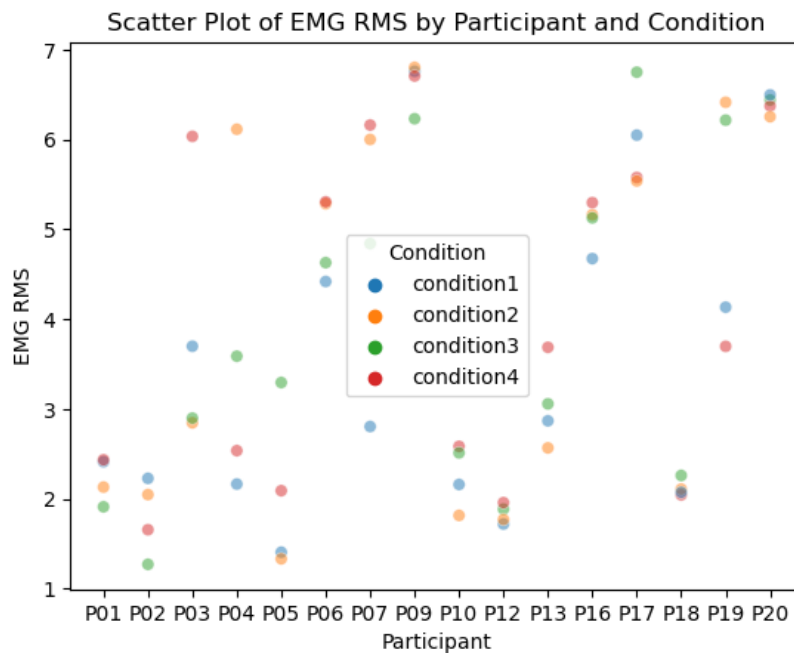


Figure 20. Dispersion d'EMG RMS par participant et condition

En résumé, bien que l'analyse descriptive ait suggéré une influence potentielle des configurations ergonomiques sur l'activité musculaire, l'analyse statistique approfondie n'a pas permis de confirmer ces observations de manière significative. Cela signifie que l'hypothèse qui affirmait que le niveau ergonomique diminuait avec l'augmentation de l'activité musculaire n'est pas supportée.

3.2.3.3.2 Impact des conditions ergonomiques sur les mouvements de la tête

Dans cette sous-section, on tente de vérifier, si l'hypothèse qui suppose que les conditions ergonomiques ont un effet sur les mouvements de la tête est vérifiée. L'analyse de variance

(ANOVA) et les tests post-hoc ont été utilisés pour examiner l'effet des conditions ergonomiques sur les données d'accéléromètre, en particulier en ce qui concerne la distance euclidienne moyenne, représentant les mouvements de la tête. L'ANOVA (tableau 11) a révélé une différence statistiquement significative entre les conditions ergonomiques ($F(3, 45) = 13.0929$, $p < 0.0001$), indiquant que la configuration ergonomique du poste de travail a un impact notable sur les mouvements de la tête.

Tableau 11. *Résultat ANOVA type-3 avec le score ergonomique en variable indépendante et la distance euclidienne moyenne en variable dépendante*

	Valeur de F	Degré de liberté du numérateur	Degré de liberté du dénominateur	Pr > F
Score Ergonomique	13.093	3	45	< 0.0001

Les tests post-hoc, ajustés selon la méthode de Holm (tableau 10) pour contrôler le taux d'erreur de type I dans les comparaisons multiples, ont fourni des indices supplémentaires sur les différences spécifiques entre les conditions :

- La comparaison entre les conditions 1 (T2.0) et 2 (T3.0) a montré une différence significative avec une valeur p ajustée de 0.0025, suggérant que la condition 2 induit des mouvements de tête différents de ceux observés dans la condition 1.
- La différence entre les conditions 1 et 3 (T1.0) était également significative (p ajusté = 0.0369), indiquant des variations dans les mouvements de la tête entre ces deux configurations.
- La comparaison entre les conditions 1 et 4 (T4.0) a révélé la différence la plus significative (p ajusté = 0.00099), soulignant un impact marqué de la condition 4 sur les mouvements de la tête par rapport à la condition 1.
- En revanche, la comparaison entre les conditions 2 et 4 n'a pas montré de différence significative (p ajusté = 0.9436), indiquant des mouvements de tête similaires dans ces deux configurations ergonomiques. Les paires (C3, C2) et (C3, C4) ont montré des valeurs-p ajustées de 0.0635 et 0.0473, respectivement, suggérant des tendances vers des différences, mais sans atteindre la significativité statistique après ajustement.

Tableau 12. *Test de Holm pour chaque paire de scores ergonomique*

Paire (score)	Valeur Ajustée p	Résultat significatif
(T1.0, T3.0)	0.063	Oui
(T1.0, T4.0)	0.047	Oui
(T3.0, T4.0)	0.944	Non
(T1.0, T2.0)	0.037	Oui
(T2.0, T3.0)	0.002	Oui
(T2.0, T4.0)	0.001	Oui

Ces résultats indiquent que certaines configurations ergonomiques influencent de manière significative les mouvements de la tête, avec des différences marquées entre la condition de base et les autres conditions testées. La condition 4, en particulier, semble induire des changements significatifs dans les mouvements de la tête par rapport à la condition initiale, ce qui pourrait refléter une ergonomie suboptimale. La paire (C2, C4) n'ayant pas montré de différence significative, cela suggère que ces deux conditions pourraient avoir des effets similaires sur les mouvements de la tête, nécessitant une exploration plus approfondie pour comprendre leurs implications ergonomiques. Ces analyses confirment l'existence d'un lien entre les mouvements de la tête et la suboptimalité ergonomique, validant ainsi l'hypothèse selon laquelle les configurations ergonomiques influencent significativement les mouvements de la tête dans les environnements de travail multi-écrans (H2).

3.2.3.3.3 Impact des mouvements de la tête sur l'activité musculaire

Maintenant, on s'intéresse à l'hypothèse qui suppose qu'il existe un lien entre les mouvements de la tête et l'activité musculaire dans un cadre ergonomique. Dans l'analyse de la relation entre l'activité musculaire (RMS_EMG) et les mouvements de la tête (représentés par la distance euclidienne moyenne), les résultats d'un modèle linéaire mixte (tableau 13) révèlent que, bien que le coefficient pour la distance euclidienne moyenne soit positif, indiquant une tendance à une augmentation de l'activité musculaire avec l'intensité des mouvements de la tête, cette relation n'est pas statistiquement significative ($P > |z| = 0.725$). Cela suggère que, dans le cadre de cette étude, il n'y a pas de preuve suffisante pour affirmer que les variations dans les mouvements de la tête, telles que mesurées par la distance euclidienne moyenne, ont un impact direct sur l'activité musculaire mesurée par l'EMG RMS. Cela signifie que l'hypothèse 3, qui cherchait à

savoir s'il existe un lien entre les mouvements de la tête et l'activité musculaire, n'a pas pu être vérifiée.

Tableau 13. *Modèle linéaire mixte de l'effet de la moyenne des distances euclidiennes de la tête sur l'activité musculaire*

Modèle	MixedLM	Variable dépendante		RMS_EMG		
Nombre d'observations	64	Méthode		REML		
Nombre de groupes	16	Échelle		0.027		
Plus petite taille de groupe	4	Log-Likelihood		9.927		
Plus grande taille de groupe	4	Converge		Oui		
Moyenne de taille de groupe	4					
	Coef.	Err. Type	z	P > z	[0.025	0.975]
Intercept	0.400	0.053	7.585	0.000	0.297	0.503
Moyenne distance euclidienne	0.016	0.045	0.351	0.725	-0.072	0.103
Variance du groupe	0.020	0.070				

3.2.3.4 Apprentissage machine

Pour confirmer l'hypothèse 4, qui cherche à vérifier s'il est possible de classifier différents niveaux d'ergonomie à l'aide des données provenant d'accéléromètre, on utilise un algorithme d'apprentissage machine. Dans l'évaluation des performances des modèles d'apprentissage machine appliqués à l'ergonomie des postes de travail multi-écrans, trois métriques clés ont été utilisées : la précision, le rappel, et le score F1. La précision mesure la proportion des identifications positives qui sont effectivement correctes, le rappel évalue la proportion des véritables positifs qui ont été identifiés correctement, et le score F1 offre une moyenne harmonique de la précision et du rappel, fournissant ainsi un équilibre entre ces deux métriques. L'écart type (STD) associé à chaque métrique reflète la variabilité des performances du modèle à travers différentes itérations de la validation croisée. Un STD élevé indique une plus grande variabilité, suggérant que la performance du modèle peut considérablement changer en fonction des données spécifiques sur lesquelles il est entraîné et testé.

Le RandomForestClassifier (RFC) et le GradientBoostingClassifier (GBC) ont été évalués, révélant des différences significatives dans leurs performances. Les meilleurs paramètres pour chaque modèle, déterminés via GridSearchCV et illustrés dans le tableau 14, montrent des configurations optimales distinctes pour maximiser leur efficacité. Pour le RFC, des paramètres

tels que le nombre d'estimateurs, la profondeur maximale, et le critère de division minimale ont été ajustés, tandis que pour le GBC, des ajustements ont été faits sur le taux d'apprentissage, le nombre d'estimateurs, et la profondeur maximale.

Tableau 14. *Meilleurs paramètres des modèles d'apprentissage machine*

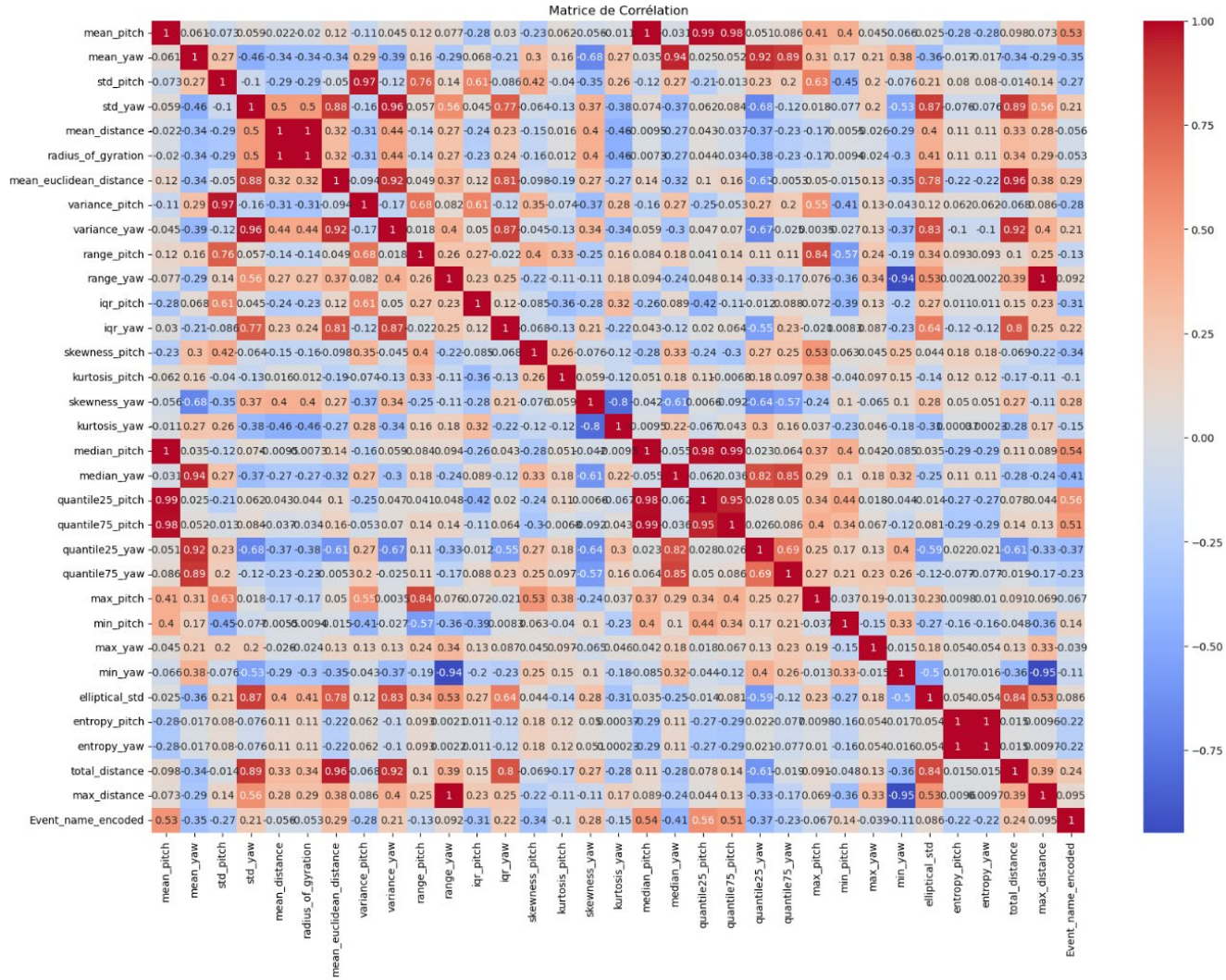
Paramètre	RandomForestClassifier	GradientBoostingClassifier
Nombre d'estimateurs	200	100
Nombre minimal d'échantillons pour diviser un nœud	5	2
Nombre minimal d'échantillons requis pour être à un nœud feuille	1	1
Nombre maximal de caractéristiques	Racine Carré	Aucun
Profondeur maximale	30	3
Bootstrap	Vrai	N/A
Taux d'apprentissage	N/A	0.1
Sous-échantillon	N/A	1.0
Poids des classes	Équilibré	N/A

Comme indiqué dans la section méthodologie, nous avons employé une matrice de corrélation (voir figure 21) pour identifier les caractéristiques les plus influentes sur le score ergonomique, qui figure dans la dernière colonne de la matrice. Cette approche nous a permis de sélectionner les attributs ayant le plus grand impact sur le score ergonomique, tout en veillant à éviter la redondance parmi les caractéristiques choisies. Par exemple, si la médiane de l'angle de tangage (corrélation de 0.54 avec le score ergonomique) est sélectionnée, il est conseillé de ne pas inclure le quantile 25% et 75% de l'angle de tangage (corrélations de 0.98 et 0.99 avec la médiane) pour prévenir tout biais dans les résultats. Par conséquent, les caractéristiques choisies pour la classification comprennent l'asymétrie de l'angle de lacet et la distance moyenne pour le RFC, et des mesures similaires avec l'ajout de la distance euclidienne moyenne pour le GBC, comme illustré dans le Tableau 15. Ces caractéristiques soulignent l'importance des données de mouvement et de positionnement dans l'évaluation ergonomique.

Tableau 15. *Meilleures Caractéristiques des Modèles d'apprentissage machine*

Caractéristique	RandomForestClassifier	GradientBoostingClassifier
Asymétrie de l'angle de lacet	X	X
Médiane de l'angle de lacet	X	X
Distance moyenne	X	-
Médiane de l'angle de tangage	X	X
Quantile 25 de l'angle de lacet	X	X
Distance euclidienne moyenne	-	X

Figure 21. Matrice de corrélation des différentes caractéristiques pour notre modèle



Les résultats de la validation croisée, présentés dans le tableau 16, indiquent une précision moyenne de 56.5% pour le RFC et de 61.9% pour le GBC, avec un rappel moyen de 67.2% et 68.3% respectivement, et des scores F1 moyens de 59.6% et 63.9%. Ces résultats, bien que montrant une performance modérée, sont renforcés par les observations faites dans le tableau 17, avec un échantillon de test stratifié de 25%, où le GBC atteint une précision de 73%, confirmant la validité des modèles dans des conditions de test variées.

Tableau 16. *Résultats de la validation croisée pour les modèles d'apprentissage machine*

	RFC	GBC
Précision Moyenne	56.5% (STD: 35.6%)	61.9% (STD: 34.5%)
Rappel Moyen	67.2% (STD: 28.5%)	68.3% (STD: 33.4%)
F1-Score Moyen	59.6% (STD: 33.8%)	63.9% (STD: 34.1%)

En comparant les résultats des deux modèles, le RandomForestClassifier (RFC) démontre une plus grande constance dans ses classifications, comme indiqué par un écart type relativement plus bas. Cette constance suggère que le RFC pourrait offrir des prédictions plus fiables sur un éventail plus large de données. En revanche, le GradientBoostingClassifier (GBC) présente une précision moyenne supérieure, indiquant une meilleure capacité à identifier correctement les classes spécifiques. Cette précision accrue pourrait signifier que le GBC est plus apte à réduire le nombre de faux positifs, c'est-à-dire les instances incorrectement classées comme appartenant à une catégorie spécifique. Dans tous les cas, l'hypothèse à travers laquelle on se demandait s'il était possible de classifier l'ergonomie d'un environnement de travail semble supporté.

Tableau 17. Résultats des modèles d'apprentissage automatique avec un échantillon de test de 0.25 et stratifié

Rapport de classification de la forêt aléatoire (RFC)				
	Précision	Rappel	Score F1	Support
0	0.67	0.50	0.57	4
1	0.43	1.00	0.60	3
2	1.00	0.50	0.67	4
3	1.00	0.75	0.86	4
Exactitude			0.67	15
Moyenne macro			0.77	15
Moyenne pondérée			0.80	15
Rapport de classification par « GradientBoosting » (GBC)				
	Précision	Rappel	Score F1	Support
0	0.75	0.75	0.75	4
1	0.50	1.00	0.67	3
2	1.00	0.50	0.67	4
3	1.00	0.75	0.86	4
Exactitude			0.73	15
Moyenne macro			0.81	15
Moyenne pondérée			0.83	15

Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons également testé l'intégration de l'EMG (RMS) comme caractéristique supplémentaire dans nos algorithmes d'apprentissage automatique. Cependant, cette inclusion n'a pas conduit à une amélioration des performances des modèles.

3.2.3.5 Revue des hypothèses

La section des résultats nous a permis d'évaluer les hypothèses posées au début de cette étude, en se basant sur des analyses quantitatives, illustrées notamment par le tableau 18. En récapitulant, nous avons exploré quatre hypothèses principales concernant l'impact des configurations ergonomiques sur l'activité musculaire et les mouvements de la tête, ainsi que la capacité de classifier ces configurations à l'aide de données physiologiques.

Tableau 18. *Récapitulatif des hypothèses et de leur conclusion*

Hypothèse	Confirmé
H1 - L'activité musculaire augmente avec la suboptimalité ergonomique	✗
H2 - La variabilité des mouvements de la tête augmente avec la suboptimalité ergonomique	✓
H3 - Il existe un lien entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête	✗
H4 - Il est possible de classifier différentes configurations ergonomiques à partir de données physiologiques	✓

L'Hypothèse 1, qui postulait une augmentation de l'activité musculaire (EMG) avec la suboptimalité ergonomique, n'a pas été confirmée par nos analyses. Les résultats ne montrent pas de différence significative en termes d'activité musculaire entre les différentes configurations ergonomiques étudiées. L'Hypothèse 2, suggérant que la variabilité des mouvements de la tête augmente avec la suboptimalité ergonomique, a été confirmée. Les analyses ont révélé des différences significatives dans les mouvements de la tête entre les configurations ergonomiques, validant ainsi l'impact de l'ergonomie sur la dynamique des mouvements de la tête. Concernant l'Hypothèse 3, qui explorait le lien entre l'activité musculaire (EMG) et les mouvements de la tête (accéléromètre), nos résultats n'ont pas permis de confirmer une corrélation significative, indiquant que les deux mesures peuvent être influencées indépendamment par les conditions ergonomiques. Enfin, l'Hypothèse 4, relative à la possibilité de classifier les configurations ergonomiques à partir de données d'accéléromètre, a été confirmée. Nos modèles d'apprentissage machine ont démontré une capacité significative à distinguer les différentes configurations ergonomiques sur la base des données d'accéléromètre, soulignant le potentiel de ces technologies pour l'évaluation ergonomique.

En somme, cette section de résultats met en évidence les nuances dans l'interaction entre l'ergonomie des postes de travail et les réponses physiologiques et comportementales des utilisateurs. Elle confirme l'importance de configurations ergonomiques optimales pour minimiser les mouvements excessifs de la tête et démontre l'utilité potentielle des outils numériques dans l'évaluation ergonomique des environnements de travail multi-écrans.

3.2.4 Discussion

La section discussion de cette étude exploratoire souligne plusieurs aspects importants concernant l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans et l'apport potentiel des technologies numériques, en particulier l'étude des mouvements de la tête, dans l'évaluation ergonomique. Les résultats obtenus soulignent l'importance de considérer les mouvements de la tête et l'activité musculaire comme des indicateurs significatifs de l'ergonomie au travail, bien que les relations directes entre ces variables et les configurations ergonomiques n'aient pas été statistiquement significatives dans tous les cas. Cette observation suggère une complexité dans la manière dont les individus interagissent avec leur espace de travail, qui ne peut être pleinement capturée par des mesures isolées. En effet, d'autres facteurs importants liés à l'ergonomie, tels que la performance, la préférence et le confort doivent également être pris en compte pour fournir des recommandations pertinentes. D'ailleurs, les résultats du questionnaire viennent corroborer notre méthodologie et la classification des configurations ergonomiques, établies principalement sur la base de la littérature spécialisée. Les préférences exprimées, la charge perçue, la performance et le confort alignent étroitement avec notre classement ergonomique initial, validant ainsi l'exactitude et la pertinence de notre score ergonomique proposé.

L'utilisation d'un logiciel développé pour synchroniser et analyser les données issues de capteurs physiologiques représente une perspective intéressante dans l'approche ergonomique. Le logiciel, en intégrant des données d'accéléromètre, offre une nouvelle perspective sur la dynamique des mouvements de la tête dans l'espace, permettant une visualisation précise et intuitive de l'orientation et de l'activité de l'utilisateur au sein de son environnement de travail. Cette capacité de visualisation, couplée à l'analyse des données EMG, fournit une base solide pour l'identification des configurations de travail potentiellement problématique ou optimal.

L'interaction entre les scores ergonomiques et les données d'accéléromètre, mise en évidence par les résultats statistiques, confirme l'intuition que les configurations ergonomiques influencent les mouvements de la tête. Les différences observées dans les mouvements selon les conditions ergonomiques suggèrent que l'accéléromètre, en tant qu'outil de mesure, peut jouer un rôle significatif dans l'évaluation de l'ergonomie des postes de travail. Cette approche offre une méthode objective pour quantifier les aspects de l'ergonomie qui étaient auparavant évalués de manière plus subjective ou indirecte.

L'application de techniques d'apprentissage automatique pour diagnostiquer les environnements de travail multi-écrans représente également une approche prometteuse. Les résultats préliminaires suggèrent la faisabilité de classifier différentes configurations ergonomiques à partir

de données physiologiques, ouvrant ainsi la voie à une approche plus objective et personnalisée de l'évaluation ergonomique. Bien que les performances actuelles des modèles nécessitent une amélioration, notamment par l'intégration de davantage de données et de configurations variées, cette méthode pourrait significativement enrichir les outils à disposition des ergonomes.

La nature exploratoire de cette étude souligne le potentiel des outils numériques et des capteurs physiologiques dans le renforcement des pratiques ergonomiques. En fournissant des données quantitatives et des visualisations de l'interaction entre l'utilisateur et son environnement de travail, ces technologies peuvent soutenir les ergonomes dans la conception de postes de travail qui non seulement améliorent la productivité, mais aussi le bien-être des employés. La possibilité de visualiser en temps réel l'impact des modifications ergonomiques sur les mouvements et l'activité musculaire ouvre de nouvelles voies pour des interventions plus ciblées et efficaces.

En conclusion, bien que cette étude n'ait pas établi de liens statistiquement significatifs entre toutes les variables étudiées, elle met en évidence l'utilité des technologies numériques dans l'évaluation ergonomique. L'accéléromètre, en particulier, se révèle être un outil précieux pour comprendre les mouvements de la tête et leur relation avec l'ergonomie du poste de travail. Ces découvertes encouragent une exploration plus approfondie de l'utilisation des technologies numériques en ergonomie, avec un potentiel significatif pour améliorer la qualité de vie au travail dans les environnements multi-écrans.

3.2.5 Conclusion

La section validation de notre étude a mis en lumière des aspects cruciaux de l'interaction entre l'ergonomie des postes de travail multi-écrans et les mouvements physiologiques, en particulier ceux de la tête, ainsi que l'activité musculaire. À travers une série d'analyses rigoureuses, nous avons exploré les hypothèses suivantes :

L'activité musculaire augmente avec la suboptimalité ergonomique : Nos résultats ont montré des tendances qui suggèrent une augmentation de l'activité musculaire dans des conditions ergonomiques jugées suboptimales, bien que les différences n'aient pas toujours atteint un seuil de signification statistique. Cela indique que, même si une relation existe, elle peut être influencée par d'autres facteurs ou nécessiter une mesure plus précise.

La variabilité des mouvements de la tête augmente avec la suboptimalité ergonomique : Les données recueillies ont confirmé que les configurations ergonomiques suboptimales entraînent une augmentation de la variabilité des mouvements de la tête. Cette constatation renforce l'idée

qu'il est possible d'améliorer l'évaluation et l'analyse de l'ergonomie des postes de travail grâce aux données d'accéléromètre.

Il existe un lien entre l'activité musculaire et les mouvements de la tête : Bien que l'analyse ait suggéré une corrélation entre les mouvements de la tête et l'activité musculaire, les résultats n'ont pas fourni de preuves concluantes d'une relation directe et systématique. Cela souligne la complexité des interactions physiologiques en jeu et la nécessité de poursuivre les recherches.

Il est possible de classer différentes configurations ergonomiques à partir de données physiologiques : L'utilisation de techniques d'apprentissage machine a montré un potentiel prometteur pour classer les conditions ergonomiques à partir des données d'accéléromètre, bien que la précision des modèles nécessite une amélioration. Cette avenue offre une perspective intéressante pour le développement d'outils d'évaluation ergonomique automatisés.

En conclusion, cette phase de validation a non seulement permis de tester et de raffiner nos hypothèses, mais a également ouvert la voie à de nouvelles questions de recherche. Les résultats soulignent l'importance d'une conception ergonomique soignée pour minimiser les risques de fatigue et de troubles musculosquelettiques, tout en mettant en évidence les défis liés à la mesure et à l'interprétation des données physiologiques dans le contexte de l'ergonomie. Les observations obtenues à partir de cette étude contribuent à une meilleure compréhension de l'interaction entre l'homme et son environnement de travail, offrant une base solide pour le développement futur d'interventions ergonomiques ciblées et de solutions technologiques innovantes.

3.3 Conclusion

À travers un processus de design science, cet article a documenté la conception, le développement, et la validation d'un artefact numérique innovant destiné à améliorer l'évaluation ergonomique des postes de travail multi-écrans. L'artefact, intégrant des données d'accéléromètre, d'EMG, et d'EDA, a été conçu pour fournir une analyse détaillée des mouvements de la tête et de l'activité musculaire, offrant ainsi une nouvelle perspective sur l'interaction entre l'utilisateur et son environnement de travail.

Les résultats de la validation ont démontré le potentiel de l'artefact à identifier les configurations ergonomiques suboptimales et à évaluer l'impact de ces configurations sur l'activité musculaire et les mouvements de la tête. Bien que les résultats aient varié en termes de significativité statistique, ils ont néanmoins souligné l'utilité de l'artefact comme outil complémentaire dans l'arsenal des

ergonomes, en particulier pour la quantification et la visualisation des aspects ergonomiques qui étaient auparavant difficiles à mesurer précisément.

L'application de techniques d'apprentissage machine a également ouvert de nouvelles voies pour l'analyse ergonomique, en démontrant la faisabilité de classifier les conditions ergonomiques à partir de données physiologiques. Cette approche représente une avancée significative vers l'automatisation et la quantification des évaluations ergonomiques, bien que des travaux supplémentaires soient nécessaires pour améliorer la précision des modèles de classification.

En conclusion, cet article contribue à la littérature sur l'ergonomie et la design science en présentant un artefact numérique qui non seulement répond à un besoin pratique identifié par les professionnels de l'ergonomie, mais ouvre également la voie à des recherches futures. Les avenues de recherche suggérées incluent l'expansion des données (quantité et variabilité) pour affiner les algorithmes d'apprentissage machine, l'intégration de mesures supplémentaires pour enrichir l'analyse ergonomique, et l'évaluation de l'impact des améliorations ergonomiques sur la productivité et le bien-être des utilisateurs.

Ce travail souligne l'importance de l'innovation technologique dans l'amélioration de l'ergonomie des postes de travail, en mettant en évidence le rôle crucial des outils numériques dans la compréhension et l'optimisation de l'interaction homme-environnement.

Chapitre 4 : Conclusion et avenues de recherche

Ce mémoire, articulé autour de deux articles, s'attaque à des questions de recherche importantes dans le domaine de l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans. La première série de questions cherche à identifier les principales préoccupations ergonomiques liées à l'utilisation de configurations multi-écrans, à comprendre comment les ergonomes évaluent et interviennent dans ces environnements, et a exploré leur perception de l'utilisation d'outils technologiques dans leur pratique. La seconde série de questions se concentre sur la possibilité d'utiliser la visualisation assistée par intelligence artificielle pour évaluer les environnements de travail multi-écrans et sur la capacité de classifier l'ergonomie de ces environnements à partir de données physiologiques et de mouvement grâce à l'apprentissage machine.

Le premier article explore le rôle des ergonomes dans l'évaluation des postes de travail multi-écrans, soulignant la complexité et la diversité des défis ergonomiques rencontrés. L'accent a été mis sur la nécessité d'adopter des approches d'évaluation qui complètent les méthodes traditionnelles. Les résultats indiquent une réceptivité notable des ergonomes à l'adoption d'outils technologiques avancés pour enrichir leur pratique, malgré les contraintes budgétaires et de temps. Cette recherche préliminaire a donc établi une fondation pour le développement d'un artefact numérique, conçu pour répondre aux besoins spécifiques identifiés. Elle a également souligné l'importance de l'analyse de l'activité comme complément essentiel à l'évaluation ergonomique, suggérant que l'intégration d'outils technologiques pourrait servir de support précieux aux démarches ergonomiques, en enrichissant l'approche traditionnellement centrée sur l'humain avec des données quantitatives et objectives.

Le second article décrit le processus de conception, de développement et de validation de cet artefact numérique. La validation de l'outil a non seulement confirmé son utilité dans la classification des configurations ergonomiques, mais a également établi un lien significatif entre les mouvements de la tête et l'ergonomie des postes de travail. Ces découvertes valident l'hypothèse selon laquelle une analyse quantitative, enrichie par des données physiologiques et de mouvement, peut améliorer substantiellement l'évaluation ergonomique des environnements de travail multi-écrans.

En conclusion, ce mémoire apporte une contribution notable à la compréhension des enjeux ergonomiques associés aux configurations multi-écrans et démontre l'efficacité d'une nouvelle approche technologique pour leur évaluation. Les implications de cette recherche sont importantes, offrant des perspectives enrichissantes pour le développement futur d'interventions

ergonomiques ciblées et la conception d'outils d'évaluation ergonomique innovants. Ces travaux ouvrent également des pistes pour des recherches futures, notamment sur l'application de ces méthodes à d'autres contextes nécessitant une analyse fine des mouvements et des données physiologiques, et renforcent l'importance de l'intégration technologique dans la pratique ergonomique.

Dans le cadre de cette étude sur l'ergonomie des environnements de travail multi-écrans, plusieurs limites ont été identifiées, soulignant des dimensions nécessitant une attention future. Premièrement, la taille et la diversité de l'échantillon, bien que suffisante pour une étude exploratoire initiale, restreignent la capacité à être généralisé des résultats obtenus. Une diversité accrue en termes d'âge, de sexe, et de conditions de travail des participants pourraient enrichir la compréhension des impacts ergonomiques. Deuxièmement, bien que les configurations ergonomiques examinées offrent un aperçu général, elles ne représentent qu'une partie des nombreuses possibilités d'aménagement des postes de travail multi-écrans. L'exploration de configurations supplémentaires pourrait révéler des observations plus nuancées sur l'optimisation de l'ergonomie. Troisièmement, l'étude s'est concentrée sur des mesures spécifiques de l'activité musculaire et des mouvements de la tête, omettant potentiellement d'autres facteurs influençant le bien-être au travail, tel que les mesures cardiovasculaires ou le stress. Enfin, la durée limitée des sessions de collecte de données ne permet pas de saisir les effets à long terme des configurations ergonomiques sur la santé et le bien-être des utilisateurs. La durée des sessions est d'ailleurs particulièrement importante avec l'EMG (fatigue musculaire par exemple), ce qui en fait probablement une des raisons pour laquelle cette variable n'a pas été significative.

Ces limites ouvrent la voie à des axes de recherche prometteurs. Des études futures pourraient viser à élargir l'échantillon et à explorer une gamme plus large de configurations ergonomiques, intégrant des mesures physiologiques complémentaires pour une analyse plus holistique. D'autres modèles d'apprentissage machine pourrait aussi être envisagés, comme les réseaux de neurones ou la machine à vecteur de support (SVM). Bien que l'étude ait révélé une relation entre l'ergonomie des postes de travail et les mouvements de la tête, l'ergonomie demeure un champ d'études complexe et étendu, impliquant de multiples facteurs. L'application pratique du logiciel par des ergonomes professionnels sur le terrain, combinant des données quantitatives avec des informations qualitatives obtenues à travers des discussions et des observations, pourrait offrir des perspectives précieuses sur les interactions entre différents éléments ergonomiques et confirmer l'utilité effective de l'outil développé.

Si on a démontré que l'utilisation d'un accéléromètre est pertinente dans l'évaluation ergonomique qu'il est possible de classer ergonomiquement le travail au bureau, l'algorithme d'apprentissage automatique pourrait bénéficier d'un nombre de données plus important et variées, que ce soit au niveau des participants, des tâches, des sources de données ou encore des configurations, afin de le rendre le plus précis et généralisable possible.

En abordant ces limites, la recherche future peut continuer à avancer vers une compréhension plus profonde de l'ergonomie dans les environnements de travail multi-écrans et à l'utilisation d'outil technologie dans ce domaine, contribuant à l'amélioration de la santé, du bien-être et de la productivité des travailleurs. Il serait également intéressant de voir comment cette approche pourrait s'appliquer à d'autres domaines et environnement que l'ergonomie multi-écrans, tel que l'aéronautique dans les cockpits ou encore à travers l'utilisation de casque de réalité virtuelle.

Bibliographie

Actograph. (2021). Logiciel. SymAlgo Technologies. <https://actograph.io/>

Altimari, L. R., Dantas, J. L., Bigliassi, M., Kanthack, T. F. D., de Moraes, A. C., & Abrão, T. (2012). Influence of Different Strategies of Treatment Muscle Contraction and Relaxation Phases on EMG Signal Processing and Analysis During Cyclic Exercise. *InTechOpen*. <https://doi.org/10.5772/50599>

Andersen, J.H., Fallentin, N., Thomsen, J. F., Mikkelsen, S. (2011). Risk Factors for Neck and Upper Extremity Disorders among Computers Users and the Effect of Interventions: An Overview of Systematic Reviews. *PLoS ONE*, 6(5): e19691. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019691>

Arduino. (2024). Arduino - Open-source electronics platform. <https://www.arduino.cc/\n>,

Axios. (2023). Promise based HTTP client for the browser and node.js - Librairie logicielle. <https://github.com/axios/axios>

Bigošová, E., Horváthová, B., & Dulina, L. (2019). The Future of Office Workplaces with an Emphasis on Ergonomics. University of Žilina, Faculty of Mechanical Engineering, *Department of Industrial Engineering*. Univerzita 1, 010 26 Žilina, Slovakia.

Cabello, R. (2023). Three.js - Librairie logicielle. <https://threejs.org/>,

CaptivErgo (2024). Logiciel. TEA. <https://teaergo.com/captiv/>

Chen Ling, Alex Stegman, Chintan Barhbaya & Randa Shehab (2017) Are Two Better Than One? A Comparison Between Single and Dual-Monitor Workstations in Productivity and User's Windows Management Style. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 33(3), 190-198.

Chowdhury RH, Reaz MBI, Ali MABM, Bakar AAA, Chellappan K, Chang TG. (2013) Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques. *Sensors*. 13(9):12431-12466. <https://doi.org/10.3390/s130912431>

Colvin, J., Tobler, N., & Anderson, R. (2004). Productivity and multi-screen computer displays. *Rocky Mountain Communication Review*, 2(1), 31-53.

Courtemanche, F., Fredette, M., Senecal, S., Leger, P. M., Dufresne, A., Georges, V., & Labonte-Lemoyne, E. (2016). Method of and system for processing signals sensed from a user. *Canadian Patent No. CA2977429C*.

Courtemanche, Léger, Fredette, Sénécal (2022). COBALT - Photobooth: Integrated UX Data System, *Declaration of invention No. VAL-0045*, HEC Montréal, Montreal, Canada.

Courtemanche, Sénécal, Fredette, Léger (2022). COBALT - Bluebox: Multimodal User Data Wireless Synchronization and Acquisition System, *Declaration of invention No. AXE-0045*, HEC Montréal, Montréal, Canada.

Courtemanche, Sénécal, Léger, Fredette (2022). COBALT - Capture: Real-Time Bilateral Exchange System for Multimodal User Data via the Internet, *Declaration of invention No. AXE-0044*, HEC Montréal, Montreal, Canada.

Daniel, J. (2012). *Sampling Essentials: Practical Guidelines for Making Sampling Choices*. SAGE Publications, <https://doi.org/10.4135/9781452272047>

Epic Games. (2023). Unreal Engine - Moteur de jeu. <https://www.unrealengine.com/>

Fang, F., Huo, F., & Feng, Y. (2023). The effects of dual screen layout on neck-shoulder muscle activity and head-neck posture variability during computer tasks. 1535-1546.

Feng, H., Golshan, H. M., & Mahoor, M. H. (2018). A wavelet-based approach to emotion classification using EDA signals. *Expert Systems with Applications*, 112, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.014>

Gerr, F., Monteilh, P.C., Marcus, M. (2006). Keyboard use and musculoskeletal outcomes among computer users. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 16: 265-277.

Google Data Arts Team. (2023). dat.gui - Librairie logicielle. <https://github.com/dataarts/dat.gui>

Griffiths, K. L., Mackey, M. G., Adamson, B. J. (2007). The impact of a computerized work environment on professional occupational groups and behavioural and physiological risk factors for musculoskeletal symptoms: a literature review. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 17:743-765.

Grundy, E., Jones, M. W., Laramée, R. S., Wilson, R. P., & Shepard, E. L. C. (2009). Visualisation of Sensor Data from Animal Movement. *EUROGRAPHICS 2009*, 28(3).

- Hamilton-Wright, A., & Stashuk, D. (2005). Physiologically based simulation of clinical EMG signals. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52(2), 171-183.
- Haynes, B. P. (2008). The impact of office comfort on productivity. *Journal of Facilities Management*, 6(1), 37-51. <https://doi.org/10.1108/14725960810847459>
- Hignett, S., Wilson, J. R., & Morris, W. (2005). Finding ergonomic solutions—participatory approaches. *Occupational Medicine*, 55(3), 200–207. doi:10.1093/occmed/kqi084
- Human Factors and Ergonomics Society. (2007). *ANSI/HFES 100-2007 Human Factors Engineering of Computer Workstations*. Human Factors and Ergonomics Society.
- Hutchings, J. (2022). What Is Ergonomics? Ergonomics in the Dental Office. <https://consensus.app/papers/what-ergonomics-hutchings/007a4a978f015654a58489dab011822c>
- Ijmker, S., Huysmans, M. A., Blatter, B. M., van der Beek, A. J., van Mechelen, W., Bongers, P. M. (2007). Should office workers spend fewer hours at their computer? A systematic review of the literature. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(4):211-222.
- Jon Peddie Research. (2009, June 1). The multiple display market and consumer attitudes. <https://www.jonpeddie.com>.
- Khronos Group. (2024). WebGL - OpenGL ES 2.0 for the Web. <https://www.khronos.org/webgl/>
- Ken Peffers, Tuure Tuunanen, Marcus A. Rothenberger & Samir Chatterjee (2007) A Design Science Research Methodology for Information Systems Research, *Journal of Management Information Systems*, 24:3, 45-77, DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302
- Léger, P. M., Karran, A. J., Courtemanche, F., Fredette, M., Tazi, S., Dupuis, M., ... & Sénécal, S. (2022). Caption and observation based on the algorithm for triangulation (COBALT): Preliminary results from a beta trial. *In NeuroIS Retreat* (pp. 229-235). Cham: Springer International Publishing.
- Magoc, T., & Magoc, D. (2011). Neural network to identify individuals at health risk. arXiv preprint arXiv:1105.1641.
- Mozilla Foundation. (2023). JavaScript - Langage de programmation. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript>
- Ooi, J. K., Ahmad, S. A., Ishak, A. J., Minhad, K., Ali, S., & Chong, Y. Z. (2018). Grove: an auxiliary device for sympathetic assessment via EDA measurement of neutral, stress, and anger

emotions during simulated driving conditions. *International Journal of Medical Engineering and Informatics*, 10(1), 16-29.

OpenJS Foundation. (2023). Node.js - Environnement d'exécution JavaScript. <https://nodejs.org/>

Optimal Workshop (2024). Logiciel. Optimal Workshop LTD. <https://optimalworkshop.com>

Owens, J. W., Teves, J., et al. (2012). Examination of dual vs. single monitor use during common office tasks. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 1506-1510.

Owens, J. W., Teves, J., et al. (2012, August 23). Are two monitors better than one? Software Usability Research Laboratory, Wichita State University. usabilitynews.org.

Pallets Projects. (2023). Flask - Framework Web. <https://flask.palletsprojects.com/>

Patel, V., Chesmore, A., Legner, C. M., & Pandey, S. (2022). Trends in workplace wearable technologies and connected-worker solutions for next-generation occupational safety, health, and productivity.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Dubourg, V. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct), 2825-2830.

Poirier, S. M., Giroux, F., Léger, P. M., Bouvier, F., Briegne, D., Chen, S. L., & Sénécal, S. (2022). Collecting Longitudinal Psychophysiological Data in Remote Settings: A Feasibility Study. In *NeuroIS Retreat* (pp. 179-186). Cham: Springer International Publishing.

Polycam. (2023). Polycam - 3D Scanning App - Application mobile. <https://www.polycam.ai/>

Project Jupyter. (2023). Jupyter Notebook - Application Web. <https://jupyter.org/>

Python Software Foundation. (2023). Python - Langage de programmation. <https://www.python.org/>

Robertson, G., Czerwinski, M., et al. (2005). The large-display user experience. Microsoft Research. Microsoft Research website.

Roelofsen, P. (2002). The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. *Journal of Facilities Management*, 1(3), 247-264. <https://doi.org/10.1108/14725960310807944>

Richtel, M. (2012). In Data Deluge, Multitaskers Go to Multiscreens. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2012/02/08/technology/for-multitaskers-multiple-monitors-improve-office-efficiency.html>

Santé publique France. (2017). Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban), 2014-2016. Volet Nutrition. Chapitre Corpulence.

St-Vincent, M., Montreuil, S., Toulouse, G., & Trudeau, R. (2015). Portrait des pratiques de prévention primaire et secondaire en bureautique au Québec chez les intervenants et dans les milieux de travail. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). *RAPPORT R-874*.

Sauer, J., Sonderegger, A., & Schmutz, S. (2020). Usability, user experience and accessibility: towards an integrative model. *Ergonomics*, 63(6), 658-674. <https://dx.doi.org/10.1080/00140139.2020.1774080>

Szeto, G. P. Y., & Sham, K. S. W. (2008). The effects of angled positions of computer display screen on muscle activities of the neck–shoulder stabilizers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38(1), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.07.014>

Tan, D., & Czerwinski, M. (2003). Effects of visual separation and physical discontinuities when distributing information across multiple displays. In Human-Computer Interaction--INTERACT '03

Unity Technologies. (2023). Unity - Logiciel de développement de jeux. <https://unity.com/>

Viriyasiripong, S., Lopez, A., Lai, W., Mitchell, G., Mandava, S. H., Boonjindasup, A., Powers, M., Silberstein, J., & Lee, B. (2016). MP20-17 Accelerometer measurement of head movement during laparoscopic surgery: Will it help optimize ergonomics of surgery? *The Journal of Urology*, 195(4, Supplement), e220. <https://doi.org/10.1016/j.juro.2016.02.2786>

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

Wahlstrom, J. (2005). Ergonomics, musculoskeletal disorders and computer work. *Occupational Medicine*, 55(3):168-176.

Wickens, C. (2021). Attention: Theory, Principles, Models and Applications. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(5), 403-417. DOI: 10.1080/10447318.2021.1874741

Wilson, J. R. (2000). Fundamentals of ergonomics in theory and practice. *Applied Ergonomics*, 31(6), 557-567. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(00\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00034-X).

Wilson, R. P., Williams, H. J., Holton, M. D., di Virgilio, A., Börger, L., Potts, J. R., Gunner, R., Arkwright, A., Fahlman, A., Bennett, N. C., (2020). An “orientation sphere” visualization for examining animal head movements. *Ecology and Evolution*, 10(8). <https://doi.org/10.1002/ece3.6197>

Wilson, R. P., Holton, M. D., Walker, J. S., Shepard, E. L. C., Scantlebury, D. M., Wilson, V. L., Wilson, G. I., Tysse, B., Gravenor, M., Ciancio, J., McNarry, M. A., Mackintosh, K. A., Qasem, L., Rosell, F., Graf, P. M., Quintana, F., Gomez-Laich, A., Sala, J.-E., Mulvenna, C. C., Marks, N. J., & Jones, M. W. (2016). A spherical-plot solution to linking acceleration metrics with animal performance, state, behaviour and lifestyle. *Movement Ecology*, 4(22). <https://doi.org/10.1186/s40462-016-0088-3>

Woo, E. H. C., White, P., & Lai, C. W. K. (2016). Ergonomics standards and guidelines for computer workstation design and the impact on users' health – a review. *Ergonomics*, 59(3), 464–475. <http://dx.doi.org/10.1080/00140139.2015.1076528>

Annexes

Annexe A :

Message de sollicitation (email):

Objet : Demande d'entrevue pour un projet de recherche sur l'ergonomie des postes de travail

Bonjour,

Je m'appelle Arthur et je suis actuellement étudiant à la maîtrise en transformation numérique à HEC. Je travaille sur un projet de recherche au Tech3lab, un laboratoire de recherche en expérience utilisateur à HEC, qui vise à étudier l'ergonomie des postes de travail à plusieurs écrans. Dans le cadre de ce projet, nous développons une solution numérique qui utilise des données capteurs et senseurs dans l'objectif de générer une visualisation 3D de l'attention visuelle. Je suis très intéressé par votre expertise en tant qu'ergonome et je pense que votre point de vue pourrait être extrêmement précieux pour notre projet. J'aimerais vous inviter à participer à une courte entrevue pour discuter de votre expérience en tant qu'ergonome et pour obtenir votre point de vue sur la pertinence et l'utilité potentielles des informations que notre projet vise à recueillir. L'entrevue ne devrait pas prendre plus de 45 minutes et peut être organisée à votre convenance, à distance ou en présentiel. Si vous êtes intéressé, veuillez me faire savoir quand vous seriez disponible et je serai ravi de fixer un rendez-vous.

Je vous remercie d'avance pour votre temps et j'espère avoir l'occasion de discuter avec vous prochainement.

Cordialement,

Approbation Éthique :

HEC MONTRÉAL

Comité d'éthique de la recherche

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE

La présente atteste que le projet de recherche décrit ci-dessous a fait l'objet d'une évaluation en matière d'éthique de la recherche avec des êtres humains et qu'il satisfait aux exigences de notre politique en cette matière.

Projet # : 2023-5389

Titre du projet de recherche : Utilisation de plusieurs écrans dans un milieu professionnel

Chercheur principal :
Pierre-Majorique Léger,
Professeur titulaire, Département de technologies de l'information, HEC Montréal

Cochercheurs :
Sylvain Sénécal; Frédérique Bouvier; Salima Tazi; Xavier Côté; Constantinos K. Coursaris; Jared Boasen;
Alexander John Karran; Luis Carlos Castiblanco Reyes; Pierre-Majorique Léger

Date d'approbation du projet : 24 avril 2023

Date d'entrée en vigueur du certificat : 24 avril 2023

Date d'échéance du certificat : 01 avril 2024



Maurice Lemelin
Président
CER de HEC Montréal

Signé le 2023-04-25 à 10:54

NAGANO Approbation du projet par le comité d'éthique suite à l'approbation conditionnelle
Comité d'éthique de la recherche - HEC Montréal

2 / 2

Guide d'entrevue

Guide d'Entrevue pour Ergonome

Introduction :

- Je m'appelle Arthur et je suis actuellement étudiant à la maîtrise en transformation numérique à HEC. Je travaille sur un projet de recherche au Tech3lab qui vise à étudier l'ergonomie des postes de travail. Notre approche utilise une méthodologie de "design science" pour développer un outil numérique qui permettra de visualiser "comment" travaille un employé dans un environnement de travail 3D. L'objectif est de mieux comprendre comment les employés interagissent avec leur environnement de travail et comment nous pourrions utiliser ces informations pour améliorer l'ergonomie des postes de travail. J'aimerais discuter avec-vous de votre expérience en tant qu'ergonome et obtenir votre point de vue sur la pertinence et l'utilité potentielles des informations que notre projet vise à recueillir.
- Pouvez-vous vous présenter et parler un peu de votre expérience en tant qu'ergonome ?

Compréhension du rôle et des responsabilités :

- Pouvez-vous décrire votre processus typique lors de l'évaluation de l'ergonomie d'un poste de travail ?

Interventions fréquentes :

- Quels sont les problèmes les plus courants que vous rencontrez en matière d'ergonomie dans les environnements de travail ?
- Quels types d'interventions recommandez-vous le plus souvent pour améliorer l'ergonomie des postes de travail ? Avez-vous des exemples de recommandations spécifiques ?

Utilisation des données :

- Quels types de données recueillez-vous généralement lors de vos évaluations ergonomiques ? Comment ces données vous aident-elles à formuler vos recommandations ?
- Avez-vous déjà utilisé des données provenant de capteurs tels que des accéléromètres, des capteurs EMG, des mesures d'EDA dans votre travail ?
 - Accéléromètre : Suit la direction de la tête de l'utilisateur.

- Capteur EMG : Mesure la tension musculaire de la nuque. Servant à Identifier les moments de tension ou de stress, et à comprendre comment l'utilisateur réagit physiquement à son environnement de travail.
- Mesures d'EDA : Évalue l'activité électrodermale, reflétant l'état émotionnel de l'utilisateur.

Outil numérique :

- Comment voyez-vous l'utilisation potentielle des outils numérique, comme des visualisation 3D, dans votre travail d'ergonome ? Pensez-vous qu'elles pourraient être utiles ?
 - Si oui, comment les utiliseriez-vous ? Pourriez-vous envisager de les utiliser en complément d'une séance de consultation ? Ou bien même remplacé une séance de consultation ?
 - Si non, pourquoi ne pensez-vous pas qu'elles seraient utiles ? Y a-t-il des obstacles spécifiques à leur utilisation ?
- Si vous deviez utiliser de tels outils, quels types d'informations aimeriez-vous voir représentées pour vous aider dans votre travail ?



Conclusion :

- Y a-t-il d'autres aspects de votre travail en tant qu'ergonome que vous aimeriez partager qui pourraient être pertinents pour notre projet ?
- Avez-vous des questions ou des commentaires sur notre projet ?



Thème et Étiquette :

Hybride Phenomene_emergent Probleme_courants ★ (+)



Muscle

Cou Epaule Poignet TMS dos (+)  

Présentation de l'ergonome

Expérience Responsabilités (+)  



Compréhension du rôle et des responsabilités (processus)

Contexte_multi_écrans Convaincre Limitation_temporelle Probleme_autonomie  



Probleme_existant_risque Productivite_percu Utilisation_des_écrans Visioconference

disposition_des_outils hauteur_mobilier (+)

Interventions fréquentes

Achat_materiel Ajustement Prévention Recommandations_spécifiques (+)  

Utilisation des données



Activité Auto_evaluation Croiser_donnees Discussion Lunette_foyer_progressif  

Mesure_anthropometrique Norme Observation Position_des_écrans Posture

Prise_de_photo_video Questionnaire Symptome Types_de_données_recueillies

Usage_des_données (+)



Outil numérique

Budget Complément_à_la_consultation Département Fiabilité Formation Obstacles_à_l'utilisation  

Perception_des_outils_numériques Reamenagement Remplacement_de_la_consultation Temps

Utilité_potentielle utilité_potentielle_negative (+)

Informations désirées pour les visualisations

Préférences Types_dinformation (+)  

Sentiments et réactions



Doutes Excitation Inquiétude Intérêt Satisfaction (+)  

Figure 28.

Annexe B: Formulaire de consentement

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT À UNE EXPÉRIMENTATION AU TECH3LAB

PRESENTATION DU PROJET DE RECHERCHE

Nous vous invitons à participer au projet de recherche portant sur l'utilisation de plusieurs écrans.

Ce projet est réalisé sous la supervision du professeur Pierre Majorique Léger que vous pouvez rejoindre par téléphone au 514 340-7013 ou par courriel à pml@hec.ca.

Ce projet est financé par la Chaire de recherche en expérience utilisateur en collaboration avec le soutien financier du CRSNG et de Desjardins.

DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION

Lors de cette expérience, il vous sera demandé de performer des tâches quotidiennes de bureau. S'il-vous-plaît, procédez à cette tâche de manière naturelle et détendue. Aucun jugement n'est porté sur vos réactions.

DESCRIPTION DES OUTILS DE MESURE UTILISÉS DANS CETTE RECHERCHE

Collecte des données de conductance de la peau (activité électrodermale), et de tension musculaire

Nous allons collecter des données physiologiques lorsque vous participerez à cette expérience. Pour mesurer vos signaux physiologiques, nous allons placer des petits senseurs adhésifs et jetables sur certaines parties de votre corps. Un ordinateur enregistrera les données transmises par ces senseurs. Il est donc possible que le chercheur vous touche aux endroits où doivent être placés ces senseurs. Aucun des senseurs utilisés ne contient du latex. En cas d'allergies ou de sensibilités cutanées aiguës, vous ne pourrez pas participer à cette expérimentation. Les senseurs placés sur votre main permettront de déterminer les niveaux de conductibilité électrique de la peau. Ceux-ci seront placés sur la paume. Les senseurs placés sur votre nuque détectent la tension musculaire et son intensité dans votre nuque. Veuillez indiquer au chercheur si vous êtes inconfortable avec le placement des senseurs dont certains pourront être disposés à différents endroits selon votre préférence. Il vous sera aussi offert d'installer vous-mêmes les senseurs dans un endroit que vous jugez privé. Les senseurs sont jetables après utilisation, ne provoquent aucune douleur, ne nécessitent aucune piqûre et ne blessent la peau en aucune manière. Lorsque qu'ils sont retirés après l'expérimentation, cela ne causera pas plus d'inconfort que de retirer un pansement adhésif. Vous avez le droit de refuser qu'ils soient placés sur votre corps. Dans ce cas, vous ne pourrez pas participer à l'expérimentation.

Collecte des données du mouvement de la tête.

Nous allons collecter des données sur le mouvement de la tête grâce à des accéléromètres, placés de manière non-intrusive au niveau de la tête. Ces petits capteurs, s'attachent à la tête de la même manière qu'un casque d'écoute et permettront de collecter des données sur la direction et l'angle de la tête pendant l'expérimentation.

Collecte de données par questionnaires :

Nous allons également mesurer par questionnaire qui vous sera présenté de manière électronique à la fin de votre expérience. Les renseignements recueillis sont anonymes et resteront strictement confidentiels; ils ne seront utilisés que pour l'avancement des connaissances, la diffusion des

résultats globaux dans des forums savants et professionnels. Vous avez le droit de refuser de répondre aux questionnaires. Dans ce cas, vous ne pourrez pas participer à l'expérimentation ou poursuivre l'expérimentation.

Les équipements utilisés par le Tech³Lab pour mesurer les signaux physiologiques ont tous été homologués au Canada et répondent aux normes de sécurité de Santé Canada ou du Conseil canadien des normes (organisme relevant du Parlement du Canada) pour une utilisation dans un contexte de recherche. Le CER (Comité d'éthique de la recherche) de HEC Montréal autorise l'utilisation de ces instruments et logiciels. Le personnel du Tech³Lab ne détient aucune formation pour l'interprétation médicale des données physiologiques, neurophysiologiques et oculométriques; par conséquent, aucune interprétation individuelle de vos données ou diagnostic de santé, ne sera fourni à la fin de l'expérience.

Votre participation à ce projet de recherche doit être totalement volontaire. Vous pouvez refuser de répondre à l'une ou à l'autre des questions. Il est aussi entendu que vous pouvez demander de mettre un terme à la rencontre, ce qui interdira au chercheur d'utiliser l'information recueillie. Pour toute question en matière d'éthique, vous pouvez communiquer avec le secrétariat du Comité d'éthique de la recherche (CER) de HEC Montréal par téléphone au 514 340-7182 ou par courriel à cer@hec.ca. N'hésitez pas à poser au chercheur toutes les questions que vous jugerez pertinentes.

POSITIONNEMENT DES SENSEURS

Les sections suivantes illustrent le positionnement des divers capteurs utilisés dans cette expérimentation

CONFIDENTIALITE DES DONNÉES RECUEILLIES

Le chercheur, de même que tous les autres membres de l'équipe de recherche, s'engage, le cas échéant, à protéger les renseignements personnels obtenus de la manière suivante :

En assurant la protection et la sécurité des données recueillies auprès des participants ou participantes et à conserver les enregistrements dans un lieu sécuritaire;

En ne discutant des renseignements confidentiels obtenus auprès des participants ou participantes qu'avec les membres de l'équipe;

En n'utilisant pas les données recueillies dans le cadre de ce projet à d'autres fins que celles prévues, à moins qu'elles ne soient approuvées par le CER de HEC Montréal. Notez que votre approbation à participer à ce projet de recherche équivaut à votre approbation pour l'utilisation de ces données pour des projets futurs qui pourraient être approuvés par le CER de HEC Montréal;

En n'utilisant pas, de quelque manière que ce soit, les données ou les renseignements qu'un participant ou une participante aura explicitement demandé d'exclure de l'ensemble des données recueillies.

Toutes les personnes pouvant avoir accès aux données ont signé un engagement de confidentialité.

Le CER de HEC Montréal a statué que la collecte des données liée à la présente étude satisfait aux normes éthiques en recherche auprès des êtres humains.

DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIENCE

Cette section précise le déroulement de l'expérience.

Avant le début de l'expérience, une explication du but de la recherche et du déroulement de l'expérience sera donnée au participant;

Le participant devra ensuite signer l'accord de consentement qui présente les diverses conditions de l'expérience.

Les participants seront invités à remplir un questionnaire pré-expérimental.

Les outils de mesures physiologiques et neurophysiologiques seront installés aux endroits appropriés sur le participant, et ce, avec son accord.

Les outils de mesure seront ensuite calibrés (2 à 10 minutes selon les outils utilisés);

Par la suite, le participant se verra attribuer une période de calme avant de lancer l'expérience afin d'obtenir des données physiologiques de référence pour la suite de l'expérience.

Le participant devra s'installer à un bureau avec plusieurs écrans, et compléter diverse tâche de la vie quotidienne au bureau, comme remplir des documents Word et chercher de l'information sur internet.

Par la suite, vous serez amené à discuter de votre expérience.

Finalement, nous vous demanderons de répondre à des questionnaires pour commenter votre perception de l'utilisation de ces technologies.

APRÈS L'EXPÉRIMENTATION :

Les capteurs seront enlevés. Pour ce faire, il est possible que le chercheur touche les participants aux endroits où se trouvent les capteurs.

Les capteurs seront retirés délicatement; les participants seront informés que cela ne cause pas plus de malaise que de retirer un pansement adhésif ou le retrait d'un casque de bain selon l'outil de mesure.

Une entrevue entre le participant et le chercheur permettra une collecte de données qualitatives, en fonction du contexte de la recherche. Toutefois, aucune interprétation clinique des données brutes ne pourra être fournie aux participants.

CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Êtes-vous âgé de plus de 18 ans ? OUI NON

Êtes-vous capable de comprendre le français, à l'orale et à l'écrit, à un niveau avancé ?
 OUI NON

Si vous avez répondu NON à une de ces questions, vous ne pouvez PAS participer à cette expérimentation.

Avez-vous des allergies cutanées ou des sensibilités particulières ?	OUI	NON
		NON
Avez-vous une correction de vue au laser ou de l'astigmatisme ?	OUI	
Avez-vous besoin de lunettes pour travailler à l'ordinateur ?	OUI	NON
Souffrez-vous ou avez-vous souffert d'épilepsie ?	OUI	NON

Si vous avez répondu OUI à une de ces questions, vous ne pouvez PAS participer à cette expérimentation.

Le chercheur, qui mène cette étude, m'a expliqué ce que je devrai faire durant l'étude et j'accepte d'y participer. Ni mon nom ou toute autre information permettant de m'identifier ne seront divulgués. Je comprends que toutes les informations que je fournirai seront gardées strictement confidentielles. De plus, je comprends que ma participation à cette étude est volontaire et que je suis libre de retirer mon consentement et de mettre fin à ma participation à tout moment.

J'accepte de participer à cette expérimentation

Cette expérimentation sera filmée. Si vous acceptez d'être filmé, toutes les vidéos seront confidentielles, protégées par un mot de passe et conservées sous clef. Les vidéos seront utilisées pour analyser vos actions et vos conversations durant l'expérience. Ces vidéos ne seront jamais publiées ou rediffusées publiquement d'une quelconque façon. Seuls les chercheurs impliqués dans le projet y auront accès.

- J'accepte que l'expérimentation soit filmée
- Je refuse que l'expérimentation soit filmée

9. SIGNATURES DU PARTICIPANT ET DU CHERCHEUR :

Prénom et nom du participant : _____

Signature du participant: _____ Date (jj/mm/aaaa): _____

Prénom et nom du chercheur : _____

Signature du chercheur : _____ Date (jj/mm/aaaa): _____

Annexe C : Protocole

Protocole PRADA

Procédure retard du participant :

- 5 minutes après l'heure de début : contacter le participant
- 15 minutes après l'heure de début du participant : annuler sa participation s'il y a un participant après
- S'il n'y a pas de participant après pendant la journée : attendre qu'il arrive et le passer
- S'il n'y a pas de participant après, mais c'est le dernier de la journée : temps d'attente de plus de 15 minutes est à votre discrétion

Procédure avant l'arrivée du participant

1. Ouvrir le formulaire de consentement
2. Qualtrics sur Ipad :
3. Préparer ActoGraph
4. Préparer Bluebox : EDA + EMG
5. Préparer Accéléromètre.

Accueil du participant

1. Accueil du participant :

- a. Demander au participant de déposer ses effets personnels dans l'espace prévu à cet effet.
- b. Demander au participant s'il doit aller à la salle de bain.
- c. Installer le participant.
- d. Le modérateur se positionne.

2. Verbatim:

“Bonjour, je m'appelle X et je serai votre modérateur pour aujourd'hui. Merci beaucoup de participer à cette étude. Vous remarquerez que je lis parfois un texte, c'est simplement pour m'assurer que toutes les instructions sont uniformes pour tous les participants.

Aujourd'hui, vous allez participer à une étude qui vise à comprendre l'ergonomie de l'environnement de travail. Vous serez invité à trouver des différences entre 2 textes à travers différentes configurations.

Au cours de cette étude, nous utiliserons des capteurs pour recueillir des données sur votre posture et votre activité. Ces capteurs sont non intrusifs et n'interféreront pas avec vos tâches. Vous serez également invité à répondre à un court questionnaire après chaque configuration.

Toutes les données recueillies seront anonymes et utilisées uniquement à des fins de recherche.

L'ensemble de l'expérience devrait durer environ 1 heure. Avez-vous des questions avant de commencer?''

3. Signature du formulaire de consentement :

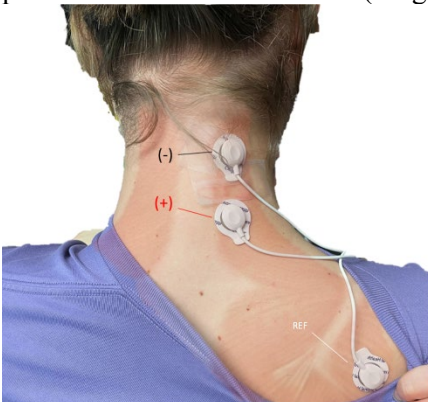
a. **Verbatim :** *“Avant de commencer, j'aurais besoin que vous lisiez et signiez ce formulaire de consentement. Il indique que vous êtes d'accord de participer à l'étude et que vous nous autorisez à collecter des données durant cette session.”*

b. Lorsque le participant a signé, vérifier le formulaire et le signer soi-même.

4. Poser les senseurs EMG au participant:

a. **Cervical Droit:**

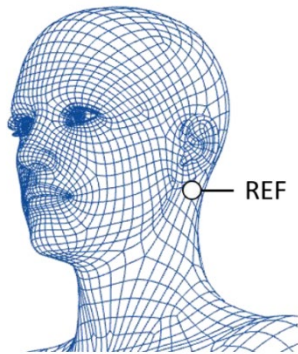
i. Installer les 2 senseurs Rouge et Noir sur le cervical droit de manière parallèle à colonne vertébrale. (rouge en bas)



ii. Installer le senseur Blanc (ref) sur la partie osseuse de l'omoplate du px ou derrière l'oreille.

b. Mettre du tape médical pour sécuriser les senseurs.

c. Brancher dans le **port A2**



5. Poser l'accéléromètre :
 - a. Pose de l'accéléromètre sur la tête (à droite)
 - b. Démarrer l'accéléromètre au début de la tâche uniquement, en demandant au participant de regarder droit devant.

DÉBUT DE L'EXPÉRIENCE

1. Instruction

- a. **Verbatim:** *“Votre tâche consiste à repérer les distinctions entre les deux textes et à les mettre en évidence en utilisant la fonction de surlignage sur l'écran de l'ordinateur portable.”*
- b. **Quand le participant termine de lire - Verbatim:** *“Avez-vous des questions ?”*
- c. Si non:
 - a. Reprendre l'Ipad
 - b. Démarrer la bluebox et s'assurer que les voyants passent au vert
 - c. Démarrer l'accéléromètre en s'assurant que l'utilisateur fixe droit devant lui. Démarrer le script de collecte sur l'ordinateur (externe).
 - d. Démarrer actograph et indiquer baseline
 - e. Faire regarder à droite à gauche en haut et en bas au participant. Mettre actograph sur ignore
 - f. Allumer les écrans selon l'ordre défini dans le excel

g. **Verbatim** : « Vous pouvez chercher les différences entre les 2 textes et les surligné en jaune à maintenant. » **Partir le chronomètre - 10min et actographe sur la bonne condition**

h. **À la fin du temps imparti** : changer actographe sur la condition “ignore”

i. **Faire remplir le questionnaire post-task (qualtrics)**

j. **Recommencer les étapes e à h**

2. Une fois les taches complétées, éteindre la bluebox et l'accéléromètre (et fermer le script).

3. Amener l'ipad et faire remplir la suite du qualtrics.

4. Fin du test

a. **Verbatim** : « L'évaluation est maintenant terminée. Merci beaucoup d'y avoir participé. ».

b. Arrêter l'enregistrement audio de l'ipad

c. Vérifier que les données Qualtrics sont bien soumises

Annexe D : Enquête Qualtrics

23/01/2024 14:10

Qualtrics Survey Software

Bloc 9

Entrez votre numéro de participant

Sexe

Genre

Age

NASA TLX

Effort Mental

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
À quel point la tâche était-elle mentalement exigeante ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Effort Physique

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
À quel point la tâche était-elle physiquement exigeante ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Performance

	Très insatisfaisant	Insatisfaisant	Ni satisfaisant ni insatisfaisant	Satisfaisant	Très satisfaisant
À quel point pensez-vous avoir bien réussi à exécuter la tâche ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Frustration

	Pas du tout frustrante	Peu frustrante	Modérément frustrante	Frustrante	Très frustrante
À quel point la tâche était-elle frustrante ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Pression Temporelle

	Très faible	Faible	Modéré	Élevé	Très élevé
À quel point avez-vous ressenti une pression temporelle pour terminer la tâche ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Effort Temporel

	Très court	Court	Modéré	Long	Très long
Combien de temps avez-vous eu l'impression de passer à réaliser la tâche ?	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Noter le confort de l'expérience

https://hecmonreal.eu.qualtrics.com/Q/EditSection/Blocks/Ajax/GetSurveyPrintPreview?ContextSurveyID=SV_8vIU040j9o2lw0&ContextLibraryID=UR_3RjZx... 1/4

Annexe E : Résultats validation expérimental - Nombre de mots sur-ligné par participant

	Écran 1	Écran 2	Écran 3	Écran 4
P01	52	53	63	54
P02	81	90	74	91
P03	42	54	58	44
P04	128	99	99	98
P05	97	103	66	74
P06	86	68	58	70
P07	53	63	47	46
P08	64	75	62	59
P09	68	57	57	44
P10	84	76	76	81
P11	35	53	53	48
P12	66	95	83	84
P13	28	60	43	45
P14	106	92	82	56
P15	69	71	74	48
P16	84	66	87	50
P17	98	79	84	88
P18	74	86	61	69
P19	73	82	69	78
P20	98	84	74	50
Moyenne	74,3	75,3	68,5	63,85

Score de performance par écran (intra participant) - Le plus le mieux :

	Écran 1	Écran 2	Écran 3	Écran 4
P01	1	2	4	3
P02	2	3	1	4
P03	1	3	4	2

P04	4	2	2	1
P05	3	4	1	2
P06	4	2	1	3
P07	3	4	2	1
P08	3	4	2	1
P09	4	2	2	1
P10	4	1	1	3
P11	1	3	3	2
P12	1	4	2	3
P13	1	4	2	3
P14	4	3	2	1
P15	2	3	4	1
P16	3	2	4	1
P17	4	1	2	3
P18	3	4	1	2
P19	2	4	1	3
P20	4	3	2	1
Moyenne	2,7	2,9	2,15	2,05

Échelle de confort : de -3 à 3

Participant	Confort 1	Confort 2	Confort 3	Confort 4
P01	2	1	2	1
P02	-1	-2	0	-2
P03	-2	1	1	-2
P04	1	-2	0	-3
P05	2	1	2	2
P06	1	1	3	-1
P07	2	-1	0	-2
P08	3	3	3	3
P09	2	-2	-1	-1
P10	3	1	2	2
P11	2	-1	1	-3

P12	2	3	3	3
P13	0	-2	1	-1
P14	-1	3	3	2
P15	-1	-2	-1	-2
P16	0	-1	1	-2
P17	1	2	2	2
P18	2	1	1	-1
P19	1	3	2	2
P20	2	-1	3	0
Moyenne	1,05	0,3	1,4	-0,15

Classement (Préférence) : De 1 à 4 - Le moins le mieux

Participant	Écran 1	Écran 2	Écran 3	Écran 4
P01	1	3	2	4
P02	3	2	1	4
P03	3	1	2	4
P04	1	3	2	4
P05	1	4	2	3
P06	2	4	1	3
P07	2	3	1	4
P08	2	3	1	4
P09	1	4	2	3
P10	1	4	2	3
P11	1	3	2	4
P12	2	3	1	4
P13	3	4	1	2
P14	4	3	2	1
P15	3	4	1	2
P16	1	3	2	4
P17	3	2	1	4
P18	1	3	2	4
P19	3	4	1	2
P20	2	3	1	4

Moyenne	2	3,15	1,5	3,35
---------	---	------	-----	------

Résultat Nasa-TLX

PX	EM1	EP1	P1	F1	PT1	ET1	EM 2	EP2	P2	F2	PT2	ET2	EM 3	EP3	P3	F3	PT3	ET3	EM4	EP4	P4	F4	PT4	ET4
P01	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	4	5	5	5	4	4
P02	4	4	5	4	5	3	3	4	5	4	5	3	5	5	5	5	5	3	5	4	5	4	5	3
P03	3	4	3	5	4	2	4	5	5	5	3	2	2	5	3	5	3	2	2	4	2	4	3	1
P04	5	4	4	4	4	4	4	2	4	3	2	3	5	3	4	3	4	3	5	1	4	2	2	2
P05	3	4	4	5	4	3	2	3	2	2	4	2	3	3	4	4	4	3	3	3	4	4	4	3
P06	2	4	2	2	2	2	2	4	2	3	3	2	4	5	3	4	3	4	2	4	2	2	4	3
P07	3	5	4	4	3	2	4	5	3	4	5	4	2	5	4	3	4	3	2	2	3	2	5	4
P08	2	4	4	4	5	3	1	4	3	3	5	3	3	4	4	4	5	3	2	4	2	3	4	5
P09	3	5	4	5	5	4	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	3	3		4	3
P10	3	5	5	4	3	4	3	4	4	4	4	3	4	5	5	4	4	4	3	4	4	3	4	3
P11	4	4	4	4	4	5	3	3	4	3	3	2	3	4	4	3	3	3	2	2	2	1	2	1
P12	4	5	5	5	4	3	5	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	4	4	5	5	4	5	3
P13	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	2	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3	4	3	4
P14	4	2	4	5	4	4	4	2	5	5	4	5	3	3	5	4	5	5	4	5	4	4	2	4
P15	3	3	4	2	4	4	2	2	3	2	4	1	3	2	4	2	4	1	2	3	4	1	4	2
P16	4	5	4	5	5	3	3	4	4	4	5	4	3	4	3	5	5	4	3	3	3	5	5	4
P17	5	3	3	5	5	3	5	4	4	5	5	2	5	4	3	5	5	3	5	3	3	5	5	3
P18	4	5	4	4	4	3	4	5	4	4	3	3	4	5	4	4	3	3	4	5	4	4	2	3
P19	2	5	3	3	2	3	4	5	4	4	4	4	4	5	4	4	3	4	3	5	5	4	2	3
P20	4	4	4	5	4	4	3	3	3	5	4	3	4	5	4	5	4	3	3	3	4	5	5	4
M1	3,5	4,15	3,9	4,15	3,95	3,4	3,35	3,7	3,75	3,8	3,9	3,05	3,6	4,21	3,95	4	3,95	3,25	3,2	3,55	3,55	3,47	3,7	3,1
M2	3,84166667						3,59166667						3,826754386						3,428947368					