

# **La souris physiologique : utilisation de capteurs physiques et physiologiques dans la réduction des symptômes de troubles musculo-squelettiques**

Mathieu Choplain, Brice Noumi, Emma Robert

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, Le Mans 72000, France  
{mathieu.choplain, emma-robert, brice.noumi\_mipo}.etu@univ-lemans.fr

**Résumé.** Chaque année, des milliers de personnes en France sont mises en arrêt de travail à cause de troubles musculosquelettiques (TMS) au poignet, principalement le syndrome du canal carpien. L'utilisation de la souris est un facteur majeur de ce problème. Pour atténuer ces TMS, nous avons conçu une souris physiologique basée sur un bracelet équipé d'un électromyogramme, ainsi qu'un tapis de souris qui intègre un capteur de force et un accéléromètre. Cette solution innovante permet de contrôler un ordinateur en déplaçant le bras, éliminant ainsi la pression sur le poignet. Nous nous attendons à ce que ce système offre une précision de contrôle comparable à celle d'une souris traditionnelle et contribue à la réduction des symptômes de TMS chez les utilisateurs. Les travaux futurs incluront des études à plus grande échelle, l'intégration de technologies avancées telles que les centrales inertielles et les algorithmes de machine learning, ainsi que l'exploration de l'intégration d'un feedback haptique pour améliorer l'expérience utilisateur. Ces recherches visent à maximiser l'impact préventif et curatif de cette technologie dans le cadre professionnel.

**Mots-clés:** troubles musculosquelettiques, capteurs physiologiques, interface homme-machine, traitement du signal.

## **1 Introduction**

Chaque année, en France, 40.000 personnes sont mises en arrêt de travail à cause de troubles musculosquelettiques (TMS). 25.000 personnes, soit plus de 60%, sont victimes de TMS au poignet, majoritairement le syndrôme du canal carpien [1]. Cette maladie peut causer des séquelles à long terme pour l'employé [2], en plus d'être un coût pour l'employeur [3]. L'utilisation de la souris est un facteur important dans ce problème, notamment à cause de la pression exercée sur le poignet [1].

Plusieurs technologies ont été mises en place afin de réduire la pression sur le poignet, notamment lors de l'utilisation d'un ordinateur [4]. Pour aider les utilisateurs à moins contraindre la position de leur main, des tapis de souris repose-paume ou repose-poignet, ainsi que des souris verticales ont été développés mais restent limitées pour les personnes atteintes de TMS [5].

Pour pallier à ce problème, nous proposons la souris physiologique - un bracelet équipé d'un électromyogramme, ainsi qu'un tapis de souris qui intègre un capteur de force et un accéléromètre, permettant de contrôler un ordinateur en déplaçant le bras, ce qui élimine la pression sur le poignet. Notre solution, la souris physiologique, est à la fois préventive et curative : en mobilisant les mouvements de la main et la contraction des muscles, tout en retirant la pression sur les poignets, elle est utilisable par tous et réduit un des facteurs de risque de développement de TMS.

Cet article commence par un état de l'art détaillant les TMS et les solutions actuelles pour atténuer leurs symptômes, en mettant l'accent sur l'utilisation de capteurs physiologiques. D'une part les capteurs physiologiques sont présentés dans la cadre des prothèses de la main, d'autre part ils sont présentés dans le cadre des TMS. Ensuite, les hypothèses de recherche sont exposées. La méthodologie d'implémentation est ensuite décrite, suivie de l'évaluation des résultats et de leur analyse critique. Enfin, les limitations de l'étude et les perspectives de recherche future sont discutées avant de conclure.

## 2 Etat de l'art

**Présentation des TMS.** Les TMS sont des pathologies qui touchent les tissus autour des articulations, principalement les muscles, les tendons, les ligaments et les nerfs [6][7]. Ces troubles sont liés à des mouvements répétitifs. Ils se manifestent de façon progressive en commençant par des gênes dans les mouvements puis des douleurs, jusqu'à une incapacité au travail ou au quotidien [8].

Les syndromes les plus répandus sont les TMS au niveau du dos et des membres supérieurs [3][9], notamment le poignet, le cou et l'épaule [4]. Un des TMS qui nous intéresse particulièrement est le syndrome du canal carpien [5][10], qui est dû à la compression du nerf médian au niveau du poignet [11]. Ce syndrome inclut des traumatismes musculaires et des dommages sur la circulation sanguine.

Un des facteurs de risque très répandu est l'activité répétitive et monotone du poignet, et le fait de garder une position qui constraint le poignet pendant une longue période. Ce syndrome se diagnostique avec des évaluations médicales et des tests électrophysiologiques [10]. L'utilisation de l'ordinateur [4], en particulier de la souris [12], sollicite fortement le poignet, ce qui en fait un facteur notable pour les TMS [13]. En effet, la souris utilisée régulièrement sollicite de petits muscles de façon répétée [14]. De plus, la reprise de la souris après l'utilisation du clavier est une action très sollicitante [15].

**Solutions existantes.** L'une des solutions existantes pour réduire l'extension du poignet est l'utilisation d'un repose-poignet [12]. Un repose-paume ainsi qu'une souris verticale ont été développés [5]. Cependant, les utilisations de ces dispositifs n'ont pas relevé des résultats significatifs concernant la réduction de la pression sur le canal carpien malgré une position du poignet plus neutre adoptée lors de leur utilisation[5].

**Signaux physiques et physiologiques et prothèses.** Une approche intéressante est la reconnaissance du mouvement de la main en utilisant des capteurs physiques et physiologiques. Des études [16][17][18][19] ont été menées pour aider les personnes amputées de leur membre supérieur à reprendre le contrôle de leur main à l'aide d'électromyogrammes (EMG).

L'EMG est un capteur physiologique permettant d'enregistrer l'activité électrique des muscles, il porte donc l'information du geste effectué par le porteur du capteur [20]. Plusieurs méthodes d'acquisition existent, dont les électrodes capacitatives qui sont sans risque et simples d'utilisation, et les aiguilles [20].

En se basant sur des données d'EMG, des modèles de reconnaissance de mouvement [19] ont été développés pour former des prothèses intelligentes [16]. Cependant, l'utilisation seule de l'EMG rend les modèles moins efficaces [16].

Il est donc intéressant de coupler les données de l'EMG avec celles d'un gyroscope [17] ou d'une centrale inertielle [18]. Dans ce cas, l'EMG est utilisé comme bouton virtuel lorsque le signal atteint un seuil donné, alors que le gyroscope est utilisé pour l'orientation du mouvement du bras [17]. L'avantage de ces technologies réside dans leur caractère non-invasif pour l'utilisateur [19] et leur adaptabilité comparées à des prothèses plus volumineuses qui peuvent être fatigantes à porter en continu [17].

Ainsi, les personnes atteintes d'amputation du membre supérieur peuvent réaliser les mouvements fondamentaux de la main [16].

**Signaux physiques et physiologiques pour les TMS.** Au-delà de l'utilisation pour des prothèses, ces données d'activité musculaire et de mouvement du bras peuvent être converties en geste afin d'interagir avec un ordinateur [18]. Les capteurs portables, tels que les accéléromètres, jouent un rôle essentiel dans cette conversion en permettant une mesure objective des mouvements humains et la détection précise des postures statiques et dynamiques. Ces dispositifs ont été validés dans diverses populations, y compris les personnes en bonne santé et celles atteintes de pathologies comme la maladie de Parkinson ou l'arthrose [21]. Leur intégration dans des programmes d'exercices pour les personnes atteintes de maladies neurodégénératives a montré des résultats prometteurs, fournissant un retour d'information instantané qui favorise l'apprentissage moteur et l'amélioration du contrôle postural [22]. De plus, dans le contexte de la surveillance de la posture des chirurgiens, les unités de mesure inertielle (IMU) se sont avérées être des outils

utiles pour prévenir les troubles musculosquelettiques en permettant une estimation précise de l'orientation des segments corporels sans gêner l'activité [7]. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer l'impact global de ces technologies sur la précision du contrôle ainsi que leur efficacité dans la prévention ou le soulagement des TMS, notamment au niveau des membres supérieurs.

De cette manière, nous posons les hypothèses suivantes :

**HR1. Un système composé d'un accéléromètre, d'un capteur de force et d'un EMG a une précision suffisante pour permettre de contrôler le curseur d'un ordinateur.**

**HR2. Une souris basée sur des capteurs physiques et physiologiques permet de prévenir ou de soulager les TMS.**

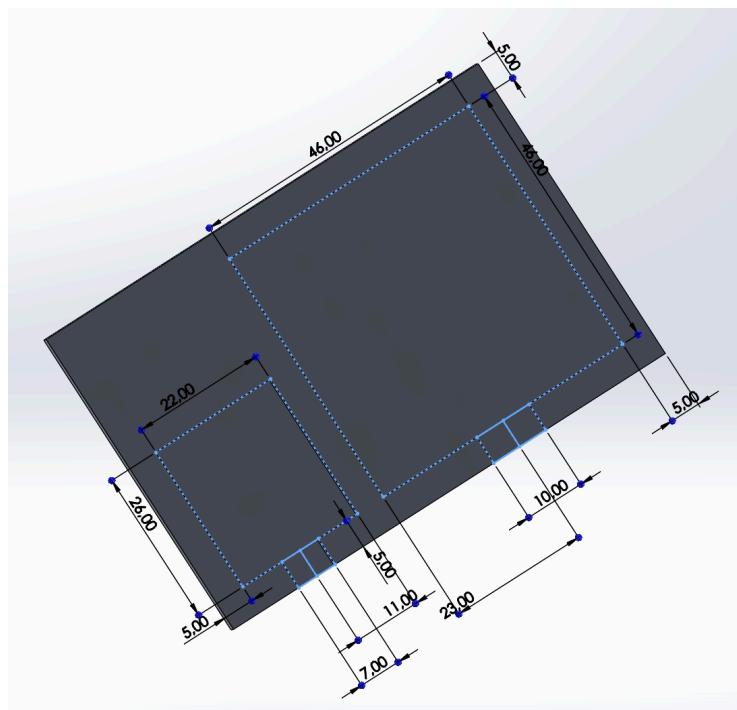
### 3 Description du système

#### 3.1 Matériel

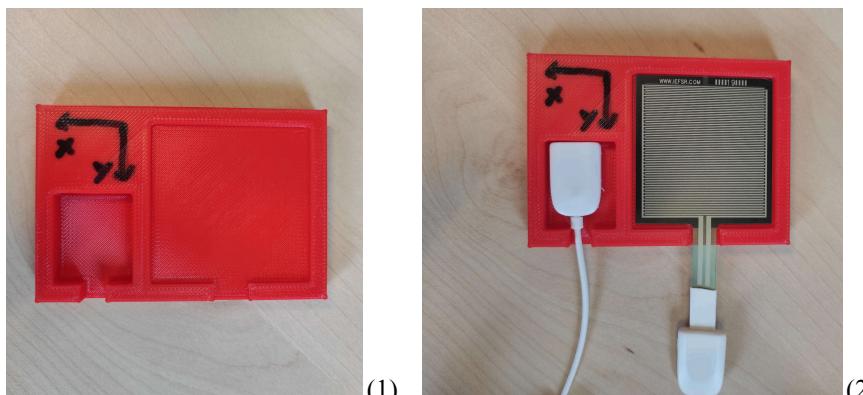
Le système d'acquisition de données utilisé dans cette étude repose sur le module BITalino. C'est une carte modulaire et compacte conçue pour la collecte de signaux physiques et physiologiques. Le BITalino est apprécié pour sa flexibilité, sa portabilité et sa capacité à interfaçer divers capteurs. Le système intègre un capteur de force pour mesurer les interactions mécaniques, un EMG pour enregistrer l'activité musculaire, et un accéléromètre triaxial pour suivre les mouvements de l'utilisateur.

**Module BITalino.** Le BITalino est un dispositif d'acquisition de données open-source qui permet de collecter, traiter et transmettre des signaux en temps réel. Il est équipé d'un microcontrôleur intégré et de plusieurs ports d'entrée analogiques, facilitant la connexion de divers capteurs. Le module est alimenté par une batterie, il s'adapte donc à des applications embarquées comme celle de la souris physiologique. Le BITalino communique avec un ordinateur hôte via une interface Bluetooth, permettant une acquisition de données sans fil et une analyse en temps réel.

**Support du système.** Le support du système est conçu pour intégrer de manière ergonomique le capteur de force et l'accéléromètre, assurant une acquisition de données optimale. Le support du capteur de force est positionné de manière à offrir une surface stable et la main de l'utilisateur, permettant de détecter l'application d'une force. À sa gauche, le support de l'accéléromètre est placé pour capturer les mouvements dynamiques du membre, fournissant des données sur l'accélération et l'orientation. Le positionnement dans un support assure que l'accéléromètre reste à plat et parallèle aux axes X et Y. Cette disposition des capteurs permet une collecte de données biomécaniques et physiologiques complète, tout en minimisant le bruit et en maximisant le confort de l'utilisateur.

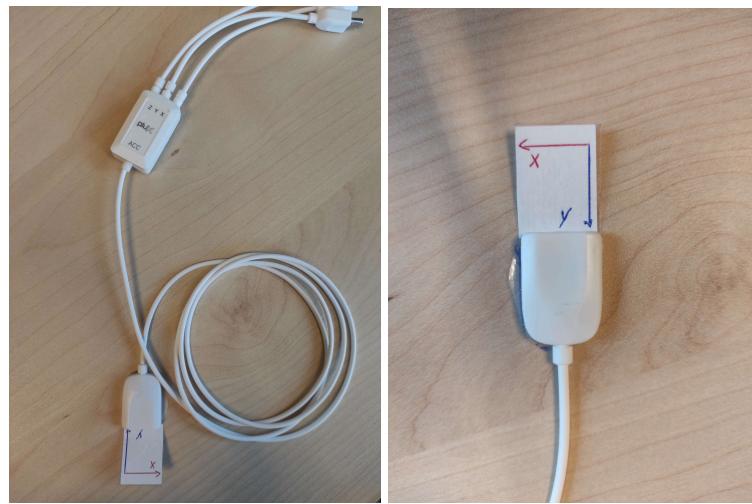


**Image 1.** Conception du support et cotes



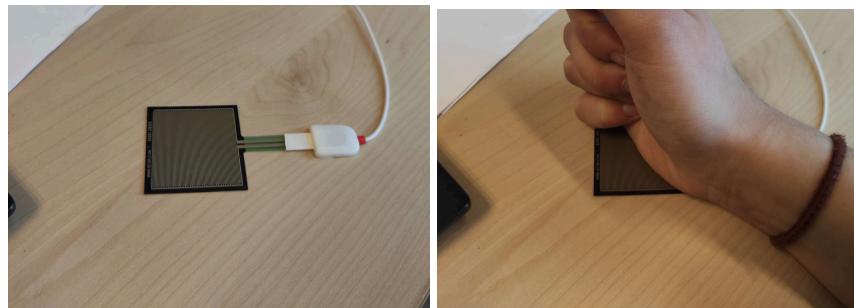
**Image 2.** Support imprimé en 3D sans(1) et avec(2) les capteurs

**Accéléromètre Triaxial.** L'accéléromètre triaxial mesure les accélérations linéaires le long de trois axes orthogonaux (X, Y, Z). Il permet de piloter le curseur du système en se basant sur les axes X et Y. Étant donné que l'accéléromètre mesure également la gravité, qui constitue une information parasite, il est essentiel qu'il reste stable en rotation. Ainsi, la gravité n'affecte que l'axe Z, qu'il est possible d'ignorer pour le pilotage du curseur. Une légende a été ajouté sur le capteur pour indiquer les axes de translation X et Y.



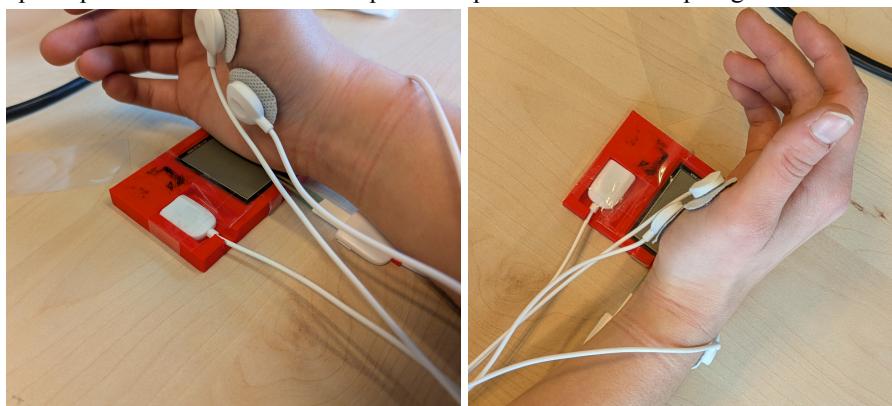
**Image 3.** Accéléromètre triaxial et sa légende

**Capteur de Force.** Le capteur de force est utilisé pour mesurer les forces appliquées sur une surface spécifique. Dans notre configuration, il est intégré comme support pour poser le bras ou la main, permettant de détecter l'interaction active de l'utilisateur avec le système. En d'autres termes, il fonctionne comme un interrupteur d'activation de la souris physiologique.



**Image 4.** Capteur de force

**EMG.** L'EMG est un capteur qui enregistre l'activité électrique des muscles. Il détecte les potentiels d'action générés par les fibres musculaires lors de leurs contractions, fournissant ainsi des informations sur l'activation musculaire. Dans ce dispositif, l'EMG sert de bouton virtuel, simulant le clic de la souris. Le capteur fonctionne avec des électrodes positionnées sur le muscle court abducteur du pouce, et la référence placée sur le pisiforme. Cette configuration permet l'activation du capteur par le mouvement isolé du pouce ou par la fermeture du poing.



**Image 5.** EMG. Position des électrodes sur court abducteur du poignet et position de la référence sur le pisiforme.

### 3.2 Architecture

L'architecture du système est séparée en 3 segments : l'acquisition des données, le traitement du signal et le contrôle de l'interface.

**Acquisition des données.** L'acquisition des données repose sur l'intégration des capteurs avec le module BITalino permettant l'enregistrement de signaux. Afin d'assurer un traitement optimal des données, un environnement de développement Python a été configuré en version 3.10.11, cette version étant compatible avec les modules nécessaires à la collecte et au traitement des signaux physiologiques. L'infrastructure logicielle mise en place comprend plusieurs bibliothèques spécifiques. La bibliothèque BITalino est utilisée pour l'établissement de la connexion avec la carte d'acquisition et l'enregistrement des signaux en temps réel. NumPy est dédiée à la manipulation et à l'analyse des données. Matplotlib permet la visualisation des signaux et la représentation graphique des tendances enregistrées.

**Traitement de signal.** Le module BITalino assure uniquement la numérisation des signaux analogiques générés par les différents capteurs. Cependant, les signaux de l'accéléromètre doivent être filtrés pour faciliter leur exploitation. En effet, même si ce dernier n'est (visuellement) pas en mouvement, il capte malgré tout des micromouvements, ce qui génère un signal haute fréquence parasite. Afin d'éliminer ce bruit, nous avons mis en place un filtre passe-bas de Butterworth avec une fréquence de coupure de 3 Hz. Un système de détection de pic est ensuite appliqué sur ce signal filtré pour détecter les mouvements, leur direction étant déduite du signe de l'accélération mesurée. Le signal du capteur de force n'est pas filtré car il est utilisé uniquement pour obtenir une information binaire (pressé / non-pressé), et ne présente aucun bruit lorsqu'il n'est pas pressé. Le signal de l'EMG n'est pas non plus filtré, car nous détectons l'activité musculaire grâce à l'écart crête-à-crête du signal - utiliser un filtre rendrait cette information inexploitable.

**Interface graphique.** Deux interfaces graphiques ont été réalisées. L'interface prototype permet d'afficher en temps réel les signaux des capteurs, filtrés le cas échéant. Les résultats de la détection de mouvement sont affichés dans la console.

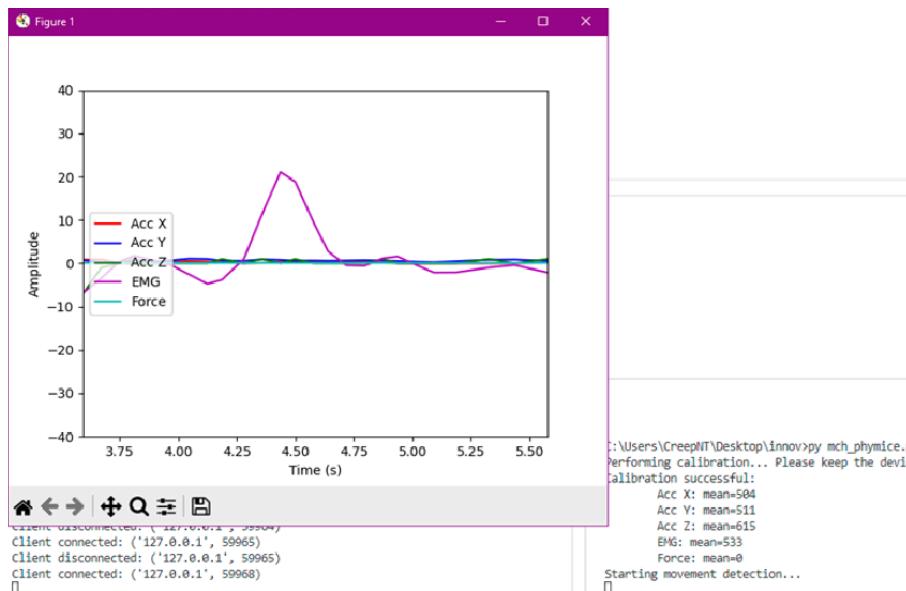
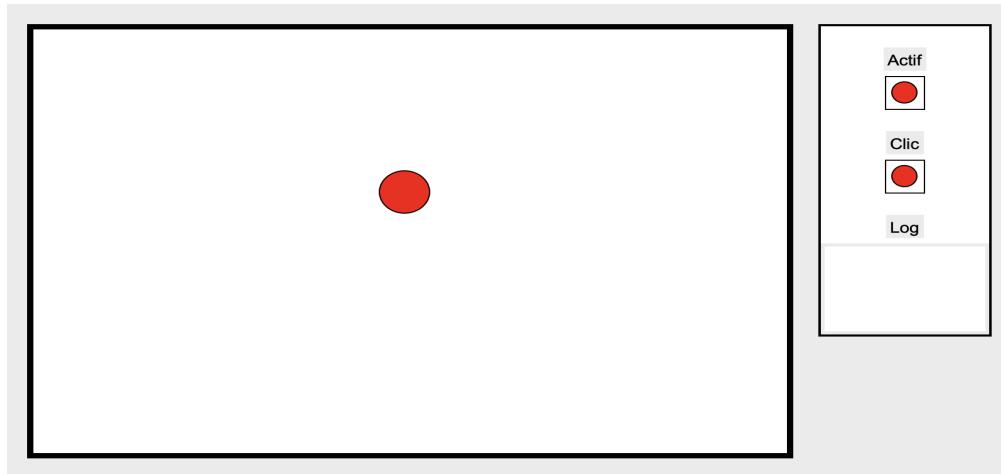


Image 6. Interface graphique prototype

L'interface v1 est plus proche du système initialement envisagé, mais nous n'avons pas réussi à l'intégrer au système de traitement des signaux en temps réel. Par conséquent, elle ne fonctionne que sur des enregistrements de signal.

Cette interface est composée de deux zones : d'abord, une zone blanche sert de zone de déplacement à une boule rouge, représentant le curseur virtuel déplacé par la souris physiologique. Ensuite, une zone de contrôle sur la partie latérale droite de permet de suivre l'état du système en cours d'utilisation. Un élément indique si une pression sur le capteur de force est détectée, en changeant de couleur (rouge / vert). Un second indique si une activité musculaire a été détectée, correspondant à un "clic" de la souris physiologique. De plus, chaque événement est enregistré dans la fenêtre de log, de façon similaire à la console de l'interface prototype.



**Image 7.** Interface graphique planifiée version 1

#### 4 Evaluation

**Contrôle et précision du curseur (HR1).** L'objectif est de déterminer si le système permet un contrôle précis du curseur d'un ordinateur. Pour ce faire, une série de tests standardisés a été conçue pour comparer les performances du système à celles d'une souris traditionnelle. Les tests incluent des tâches de pointage, de déplacement sur l'interface et de clic, afin de mesurer l'exactitude et la réactivité du curseur. Les indicateurs de performance incluent le temps de réponse, le taux d'erreur, et la satisfaction utilisateur. Les résultats attendus sont une précision comparable ou supérieure à celle d'une souris traditionnelle, avec des temps de réponse rapides et un faible taux d'erreur.

**Impact sur les TMS (HR2) :** L'objectif est d'évaluer si l'utilisation du système atténue la charge physique et les symptômes associés aux troubles musculosquelettiques (TMS). Des études longitudinales seront menées avec un échantillon de 50 individus diagnostiqués avec des TMS et 100 individus sans diagnostic de TMS, tous volontaires. Les symptômes des participants seront évalués avant et après l'utilisation du système par un médecin qualifié. Les indicateurs incluront le niveau de douleur, la fatigue musculaire, et l'amélioration de la posture. Un questionnaire sur la santé musculosquelettique, tel que celui disponible sur Pharesst [23], sera utilisé pour évaluer l'impact subjectif du système et les zones de TMS des participants. Les résultats attendus incluent une réduction significative des symptômes de TMS chez les utilisateurs diagnostiqués. Pour les personnes sans TMS, 50 participants utilisent une souris classique et 50 autres une souris physiologique. Les résultats attendus incluent une différence notable dans l'apparition des symptômes entre le groupe utilisant une souris classique et celui utilisant une souris physiologique.

**Échantillon.** L'étude implique un total de 200 participants, divisés en deux groupes distincts. Le premier groupe est composé de 100 personnes ayant reçu un diagnostic de TMS, tandis que le second groupe comprend 100 personnes sans diagnostic de TMS. Tous les participants sont volontaires et sont sélectionnés pour représenter une diversité de profils utilisateurs. Les critères d'inclusion pour le groupe avec TMS comprennent une évaluation médicale confirmant le diagnostic et

la présence de symptômes actifs. Pour le groupe sans TMS, les participants doivent être exempts de tout trouble musculosquelettique ou condition pouvant affecter l'utilisation du système. Cette répartition permet de comparer l'efficacité du système entre les utilisateurs avec et sans TMS, fournissant ainsi une évaluation complète de son impact potentiel.

**Tests à long terme.** L'objectif est d'évaluer l'efficacité du système sur une période prolongée pour s'assurer de sa viabilité et de son acceptabilité par les utilisateurs. Les participants sont suivis sur 12 mois pour observer les changements dans leurs symptômes de TMS et l'adaptation à l'utilisation du système. Les résultats attendus sont le maintien ou l'amélioration des résultats initiaux concernant la réduction des symptômes de TMS et la précision du contrôle du curseur.

## 5 Discussion

La discussion de cette étude se concentre sur les hypothèses de recherche et les attentes concernant le système de souris physiologique, en envisageant à la fois les meilleurs et les pires scénarios possibles.

**Aspect technique du système.** Dans le meilleur des cas, le système pourrait offrir une précision de contrôle du curseur comparable ou même supérieure à celle d'une souris traditionnelle. Les utilisateurs pourraient rapidement s'adapter au dispositif, avec des temps de réponse rapides et un faible taux d'erreur. Cependant, dans le pire des cas, la précision pourrait varier considérablement d'un utilisateur à l'autre, rendant le système inefficace pour certains. Une période d'adaptation prolongée pourrait être nécessaire, ce qui pourrait décourager certains utilisateurs. De plus, des dysfonctionnements techniques, tels que des interférences de signal ou des défaillances matérielles, pourraient compromettre la précision et la fiabilité du système.

**Impact sur les TMS.** Dans le meilleur des cas, l'utilisation du système pourrait entraîner une réduction notable des symptômes de TMS chez les utilisateurs diagnostiqués, améliorant ainsi leur qualité de vie au travail. Pour les personnes sans TMS, l'utilisation de la souris physiologique pourrait prévenir l'apparition de symptômes, démontrant ainsi un effet préventif significatif. Cependant, dans le pire des cas, le système pourrait ne pas réduire les symptômes de TMS de manière significative, en particulier pour les utilisateurs ayant des TMS sévères ou des conditions médicales complexes. De plus, les utilisateurs pourraient ne pas adopter le système de manière cohérente, ce qui limiterait son impact potentiel sur la prévention des TMS.

**Limites du système.** Malgré les avantages présentés, certaines limitations doivent être prises en compte. Tout d'abord, la stabilité du capteur d'accéléromètre est cruciale pour garantir une détection précise. Toute variation involontaire du positionnement de l'appareil peut introduire des erreurs dans la reconnaissance des mouvements, compromettant ainsi la précision du contrôle du curseur. Ainsi, l'accéléromètre doit par exemple être maintenu à plat, sans quoi l'accélération due à la pesanteur affectera ses mesures. De plus, l'accéléromètre mesure uniquement des accélérations (i.e., principalement des à-coups) plutôt qu'une vitesse ou une position. Cela rend la détection des mouvements moins fluide et plus sensibles aux interférences, notamment lorsque l'utilisateur effectue des gestes rapides ou saccadés. L'utilisation d'une centrale inertielle, qui combine plusieurs accéléromètres, gyroscopes, voire même des magnétomètres ainsi qu'une circuiterie de contrôle, peut aider à pallier ces limitations en fournissant des mesures de qualité et précision bien supérieures.

La variabilité des réponses physiologiques des utilisateurs à l'EMG peut également influer sur la fiabilité de la détection du clic. Les différences individuelles dans la force musculaire et la réactivité peuvent entraîner des variations dans les signaux enregistrés, rendant difficile l'établissement d'un seuil de détection universel. Bien qu'une étape de calibration ait été implémentée dans le système, elle reste très limitée et ne réduit pas vraiment la sensibilité au bruit du système. Un meilleur système de calibration pourrait améliorer l'adaptabilité du système à

différents profils d'utilisateurs, en ajustant les paramètres de détection en fonction des caractéristiques physiologiques spécifiques de chaque individu.

La précision du contrôle pourrait également varier d'un utilisateur à l'autre, nécessitant une période d'adaptation plus longue pour certains. Le système repose sur plusieurs capteurs et une infrastructure logicielle complexe, ce qui pourrait poser des défis en termes de maintenance et de déploiement à grande échelle. Bien que l'échantillon soit diversifié, il reste limité en taille. Des études avec un plus grand nombre de participants pourraient fournir des résultats plus robustes. D'autres facteurs, tels que l'ergonomie du poste de travail ou les habitudes de travail, pourraient également influencer les résultats.

## 6 Conclusion

Les TMS au poignet, notamment le syndrome du canal carpien, représentent un problème majeur pour de nombreux utilisateurs d'ordinateurs, entraînant des arrêts de travail et des coûts importants pour les employeurs. L'objectif de cette étude était de concevoir une solution innovante pour atténuer ces problèmes en développant une souris physiologique. Ce système, composé d'un bracelet équipé d'un électromyogramme et d'un accéléromètre, ainsi que d'un tapis de souris avec capteur de force, permet de contrôler un ordinateur par des mouvements du bras, réduisant ainsi la pression sur le poignet.

Bien que les résultats empiriques ne soient pas encore disponibles, les hypothèses de recherche suggèrent que ce système pourrait offrir une précision de contrôle comparable à celle d'une souris traditionnelle tout en contribuant à la réduction des symptômes de TMS. La contribution potentielle de cette technologie réside dans sa capacité à offrir une alternative ergonomique et préventive, améliorant ainsi le bien-être des utilisateurs dans divers contextes professionnels.

Pour surmonter les limitations actuelles et optimiser le système de souris physiologique, plusieurs pistes de recherche sont envisagées.

Dans la version actuelle, les déplacements sont saccadés, détectés par des pics ou des intervalles. Une version améliorée du système pourrait intégrer un traitement de signal plus avancé, permettant des déplacements plus fluides. L'utilisation d'une centrale inertielle, combinant accéléromètre, gyroscope et potentiellement un magnétomètre, permettrait de tracer des mouvements fluides et continus, plutôt que des à-coups. Cette approche offrirait une détection plus précise et naturelle des gestes de l'utilisateur.

L'interface graphique sera également améliorée pour refléter ces avancées. Elle pourrait tracer des lignes représentant les mouvements effectués, offrant ainsi un retour visuel immédiat. De plus, l'ajout d'un système de chemin à suivre pourrait guider l'utilisateur dans ses interactions, améliorant ainsi la précision et l'efficacité du contrôle du curseur dans la réalisation des tests.

L'ajout d'un algorithme de machine learning pourrait également affiner la reconnaissance des mouvements. En apprenant des données collectées, l'algorithme pourrait adapter dynamiquement les seuils de détection, améliorant ainsi la précision et la réactivité du système pour chaque utilisateur. Cette personnalisation permettrait de mieux prendre en compte la variabilité des réponses physiologiques individuelles.

Enfin, des études à plus grande échelle et un suivi à long terme seront nécessaires pour valider l'efficacité et l'acceptabilité du système. Ces recherches permettront d'évaluer l'impact global du dispositif sur la santé musculosquelettique des utilisateurs et d'identifier les améliorations potentielles pour les futures itérations.

## Références

1. Troubles musculosquelettiques (TMS). Statistiques - Risques. (2015, February 4). INRS. Retrieved February 14, 2025, from <https://www.inrs.fr/risques/tms-troubles-musculosquelettiques/statistiques.html>
2. Chang, Y. F., Yeh, C. M., Huang, S. L., Ho, C. C., Li, R. H., Wang, W. H., & Tang, F. C. (2020). Work ability and quality of life in patients with work-related musculoskeletal disorders. *International journal of environmental research and public health*, 17(9), 3310.
3. Crawford, J. O., Berkovic, D., Erwin, J., Copsey, S. M., Davis, A., Giagloglou, E., ... & Woolf, A. (2020). Musculoskeletal health in the workplace. *Best practice & research clinical rheumatology*, 34(5), 101558.
4. Jensen, C., Finsen, L., Søgaard, K., & Christensen, H. (2002). Musculoskeletal symptoms and duration of computer and mouse use. *International journal of industrial ergonomics*, 30(4-5), 265-275.
5. Schmid, A. B., Kubler, P. A., Johnston, V., & Coppieters, M. W. (2015). A vertical mouse and ergonomic mouse pads alter wrist position but do not reduce carpal tunnel pressure in patients with carpal tunnel syndrome. *Applied ergonomics*, 47, 151-156.
6. Luttmann, A., Jäger, M., Griefahn, B., Caffier, G., Liebers, F., & World Health Organization. (2004). La prévention des troubles musculo-squelettiques sur le lieu de travail. In La prévention des troubles musculo-squelettiques sur le lieu de travail/Alwin Luttmann...[et al.].
7. Carbonaro, N., Mascherini, G., Bartolini, I., Ringressi, M. N., Taddei, A., Tognetti, A., & Vanello, N. (2021). A wearable sensor-based platform for surgeon posture monitoring: a tool to prevent musculoskeletal disorders. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3734.
8. Miranda, H., Kaila-Kangas, L., Heliövaara, M., Leino-Arjas, P., Haukka, E., Liira, J., & Viikari-Juntura, E. (2010). Musculoskeletal pain at multiple sites and its effects on work ability in a general working population. *Occupational and environmental medicine*, 67(7), 449-455.
9. Denis, D., St-Vincent, M., Imbeau, D., Jette, C., & Nastasia, I. (2008). Intervention practices in musculoskeletal disorder prevention: a critical literature review. *Applied ergonomics*, 39(1), 1-14.
10. Genova, A., Dix, O., Saefan, A., Thakur, M., & Hassan, A. (2020). Carpal tunnel syndrome: a review of literature. *Cureus*, 12(3). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7164699/>
11. Mediouni, Z. (2018). *Syndrome du canal carpien et travail sur ordinateur* (Doctoral dissertation, Université Paris Saclay (COmUE)).
12. Lalumière, A., & Collinge, C. (1999). Revue de la littérature et avis d'experts sur les troubles musculo-squelettiques associés à la souris d'ordinateur.
13. Cook, C., Burgess-Limerick, R., & Chang, S. (2000). The prevalence of neck and upper extremity musculoskeletal symptoms in computer mouse users. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(3), 347-356.
14. Dhengre, N., Rajput, N. S., & Katarne, R. (2023, June). Design of computer mouse based on ergonomic parameters. In *AIP conference proceedings* (Vol. 2760, No. 1). AIP Publishing.
15. Gaudez, C., & Cail, F. (2016). *Effets sur les sollicitations musculaires et posturales, sur la performance et le ressenti des utilisateurs de différentes souris informatiques et de leur positionnement sur le bureau* (Doctoral dissertation, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)).
16. Yao, P., Wang, K., Xia, W., Guo, Y., Liu, T., Han, M., ... & Xue, N. (2024). Effects of training and calibration data on surface electromyogram-based recognition for upper limb amputees. *Sensors*, 24(3), 920.
17. Cannan, J., & Hu, H. (2013, September). Feasibility of using gyro and EMG fusion as a multi-position computer interface for amputees. In 2013 Fourth International Conference on Emerging Security Technologies (pp. 75-78). IEEE.
18. Matos, A., Adão, T., Magalhães, L., & Peres, E. (2016). A myographic-based HCI solution proposal for upper limb amputees. *Procedia Computer Science*, 100, 2-13.
19. Ovadia, D., Segal, A., & Rabin, N. (2024). Classification of hand and wrist movements via surface electromyogram using the random convolutional kernels transform. *Scientific Reports*, 14(1), 4134.

20. Islam, M. J., Rumman, U., Ferdousi, A., Pervez, M. S., Ara, I., Ahmad, S., ... & Islam, M. R. (2024). Impact of Electrode Position on Forearm Orientation Invariant Hand Gesture Recognition. arXiv preprint arXiv:2410.00029.
21. Lugade, V., Fortune, E., Morrow, M., & Kaufman, K. (2014). Validity of using tri-axial accelerometers to measure human movement—Part I: Posture and movement detection. *Medical engineering & physics*, 36(2), 169-176.
22. Li, X., Chen, Z., Yue, Y., Zhou, X., Gu, S., Tao, J., ... & Du, Q. (2022). Effect of wearable sensor-based exercise on musculoskeletal disorders in individuals with neurodegenerative diseases: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 14, 934844.
23. Forcier, L., Beaugrand, S., Lortie, M., Lapointe, C., Lemaire, J., Kuorinka, I., . . . Buckle, P. (2001). Questionnaire NORDIQUE : questionnaire sur la santé musculo-squelettique des travailleurs (Fiche n° RG1-270). IRSST.