



**HAL**  
open science

# Étude des mécanismes du contrôle sensorimoteur pour la spécification de nouvelles métriques d'évaluation du coût cognitif

Kelly Steiner

► **To cite this version:**

Kelly Steiner. Étude des mécanismes du contrôle sensorimoteur pour la spécification de nouvelles métriques d'évaluation du coût cognitif. Robotique [cs.RO]. Sorbonne Université, 2024. Français. NNT : 2024SORUS064 . tel-04622259

**HAL Id: tel-04622259**

**<https://theses.hal.science/tel-04622259>**

Submitted on 24 Jun 2024

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

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

# THÈSE

Pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SORBONNE UNIVERSITÉ

Discipline : Robotique

Présentée et soutenue par

**Kelly STEINER**

Le 18 mars 2024

Étude des mécanismes du contrôle sensorimoteur pour la  
spécification de nouvelles métriques  
d'évaluation du coût cognitif

**Sous la direction de :**

M. Jean-Christophe Sarrazin, DR, Université Aix-Marseille ONERA

M. Sinan Haliyo, MC, Sorbonne université ISIR.

**Composition des membres du jury :**

Président du jury : M. Vincent Padois, DR, Université Bordeaux INRIA (examineur)

Mme Frédérique Hintzy, DR, Université Savoie Mont-Blanc LIMB (rapporteuse)

M. Alexandre Zénon, DR, Université Bordeaux Neuroscampus (rapporteur)

Mme Agnès Roby-Brami, DR émérite, Sorbonne université ISIR INSERM (examinatrice)

M. Jérémie Gaveau, MC, Université de Bourgogne (examineur)



A mon père, ma mère et mon frère,



## REMERCIEMENTS

*« Alors, si je peux me permettre de te donner un conseil c'est : oublie que tu as aucune chance, vas-y fonce. On sait jamais, sur un malentendu ça peut marcher. »*

*Jean Claude Dusse*

*Il me semble important de remercier toutes les personnes qui m'ont soutenue et accompagnée au quotidien durant cette aventure qu'a été ma thèse.*

*Tout d'abord, je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail, et pour nos échanges lors de la soutenance.*

*Je remercie mon directeur de thèse Sinan pour avoir accepté de me prendre comme thésarde. Merci d'avoir répondu au mieux à mes besoins même si ça n'a pas été simple avec la distance, tu as fait de ton mieux pour m'accompagner durant cette thèse.*

*Je tiens à remercier mon second directeur de thèse Jean-Christophe. JC, je ne sais pas par où commencer... Peut-être tout simplement : merci du fond du cœur ! Merci de m'avoir fait grandir sur le plan professionnel et scientifique durant cette thèse avec toutes nos discussions, nos échanges. Merci pour ta bienveillance, ta présence, ton humanité et ta patience. Cette thèse n'aura pas été facile tant nous avons dû surmonter d'évènements. Merci d'avoir fait le maximum pour que tout se passe bien, de m'avoir soutenue comme tu l'as fait, je peux t'en être qu'extrêmement reconnaissante. Merci d'avoir cru en moi, d'avoir partagé quelques folies (les essais en vol en sont un bon exemple) et de toujours resté réconfortant et franc. Merci pour ta bonne humeur, ton rire communicatif et tout ce que tu investis auprès de nous, tu te donnes à 1000%, j'espère avoir réussi à te rendre fier de notre travail ensemble. Ça été une véritable chance de faire ma thèse à tes côtés.*

*Je remercie mes encadrants à commencer par Bruno ! Si j'ai effectué une thèse avec vous c'est grâce à toi car tu m'avais acceptée pour mon stage de master à l'ONERA ! Alors tout d'abord : Merci de m'avoir laissé ma chance et d'avoir cru en moi ! Merci pour toutes nos discussions et ton aide durant cette thèse ! Merci pour ton soutien, tes mots dans les phases difficiles et ta bonne humeur au quotidien ! Tu es un petit soleil au labo et on a de la chance de t'avoir pour nous encadrer ! Tu es toujours présent pour nous, toujours de bons conseils avec beaucoup de tact, de bienveillance pour nous faire évoluer ! Je me souviendrais de cette phrase « Choisir c'est renoncer » et que renoncer peut être une bonne chose. Et puis allez l'OM !*

*Christian, du manche haptique fou, au développement d'une simulation de loi de Fitts (où on n'en voyait pas le bout) jusqu'aux essais en vol : il n'y a qu'un pas, car tu étais*

---

## REMERCIEMENTS

---

là ! Comme je le dis depuis le début tu es un peu le génie sauveur du labo, tu as toujours une solution : un véritable couteau suisse (plutôt italien) avec une grande humilité ! Merci pour tout, ton aide, ton amitié et ton soutien ! Tu as supporté le « kelliien » pas toujours facile à décrypter avec humour ! Il va me falloir quelques dizaines d'années pour te faire parvenir les plusieurs semi pour te remercier ! Ça a été un véritable plaisir et une chance de travailler avec toi et de t'avoir rencontré ! Merci pour ta gentillesse, ta sagesse, ton investissement car tu as toujours été prêt à m'aider ! Je conclurai par un immense merci puis on va faire vivre la discussion 'le gras c'est la vie' au-delà de la thèse. « Je crois qu'il faut que vous arrêtiez d'essayer de dire des trucs » !

Nicolas, tu es arrivé au labo après ta mutation interne et malheur tu as été mis sur mon sujet de thèse pour m'aider. Quelle chance que tu n'aies pas mis de chapelet d'oignons pour m'empêcher d'entrer dans ton bureau ! Trêve de plaisanteries : Merci pour tout ton investissement durant ma thèse, toute ton aide pour le traitement des données ! Mais aussi merci pour ton soutien dans les moments difficiles et nos discussions « avancé des travaux 2.0 », l'apprentissage du badminton. C'était très enrichissant de pouvoir travailler avec toi ! J'ai eu beaucoup de chance de croiser ta route ! Merci pour tout ! Je pense qu'au vu de l'augmentation de notre charge cognitive pour la compréhension du portrait de comparaison de mode et tout le reste on aura bien mérité des vacances ! J'espère que malgré tout, tu garderas un beau souvenir de cette aventure partagée.

Je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe de la DGA-EV (Guillaume, Gaëlle, Joël, Tony et Gwen) pour notre aventure essais en vol ! Ça n'a pas été simple mais nous y sommes arrivés dans la joie et la bonne humeur ! Maintenant, je ne me trompe plus dans la conversion pouce/cm ahah ! Merci à vous pour cette belle aventure qui restera à jamais gravée et je garde précieusement votre écusson. Qui sait peut-être à bientôt !

Parler de ma thèse revient à parler de mes petits fantastiques (Nico, Marine et Eva), ils ont été mes petits soleils du quotidien ! Quelle chance d'avoir un bureau partagé avec vous trois ! Nos aventures de sport (les wods), nos coups de mous, nos coups de joies, nos pleurs et nos fous rires ! Merci pour votre soutien sans faille ! Je ne pourrai jamais assez remercier la vie de m'avoir permis de rencontrer d'aussi belles personnes ! Je me rappellerai de tous nos moments avec un petit pincement au cœur, car notre quotidien ensemble va me manquer ! Fini les opérations chaussettes post sport ! Mais d'autres aventures nous attendent, j'en suis sûre. Alors, merci mes petits fantastiques ! Je souris encore en repensant : « Ah, aujourd'hui j'ai fait une 'Kelly' ».

Francinette, je ne t'oublie pas ! Merci mille mercis pour tous nos moments, tu es véritablement la petite maman de l'ONERA. Comme on le dit souvent, on est incapable de savoir depuis quand notre amitié s'est tissée. Quelle chance de t'avoir rencontrée, ton

---

## REMERCIEMENTS

---

soutien, nos moments de partages au sport, nos discussions sur la vie (et la mort aussi), à nos rires. Merci car tu es une personne incroyable et entière, tu es une magnifique rencontre.

Je me dois de te remercier, Greg, à la fois pour ton aide technique, ton soutien et ta bienveillance ! Merci d'avoir été présent dans un des moments les plus délicats de ma vie, je ne pourrai jamais t'en être assez reconnaissante ! Merci !

Merci à toute l'équipe de l'ONERA !! Paolo pour nos discussions matinales ; Gilles pour tes passages express dans notre bureau, Cécile pour toutes nos discussions de covoiturages, ton soutien et tes conseils ; Antonin pour ton soutien, ta bienveillance et nos discussions ; Stefania pour ton soutien discret et délicat ; Emma et nos moments piscines, nos moments sports et les formations de rédaction de soutenance de thèse ; j'en oublie certains mais j'ai une pensée pour toute l'équipe ! C'étaient de belles années avec des personnes comme vous ! En tout cas, merci à vous tous de m'avoir fait vivre à vos côtés une aventure de thèse incroyable, une parenthèse unique qui a été énormément riche humainement et scientifiquement parlant !

J'ai été bien entourée dans le cadre du travail mais aussi dans le cadre personnel.

Je tiens à remercier mes amis pour leur soutien. Quelle chance j'ai de pouvoir compter sur vous et de vous avoir à mes côtés au fil des années dans les bons et les mauvais moments, c'est terriblement rassurant ! Une dédicace particulière à ma seconde amie, ma gégé merci de m'avoir soutenue comme tu l'as fait. Tu as toujours été là avec un mot positif même quand j'étais un peu hors vie sociale. Merci ma caille d'être la personne formidable que tu es.

Je remercie également ma famille sportive bénévolat de Mandelieu pour leur amitié et leur soutien.

Je remercie ma belle-famille pour ses petits mots attentionnés, ainsi que Catherine pour toutes ses prières et encouragements et également Laurence.

Je tiens à remercier mon compagnon, mon p'tit poulet ! Je sais que je ne suis pas toujours facile à vivre, et oui mais quelle idée de s'être amouraché d'une doctorante pas sûre d'elle, ce n'est pas simple ! En plus s'ajoute à ça parfois ma maladresse : le combo. On aura vécu de nombreux chamboulements et grandi durant ces années de thèse. Je tiens à te remercier pour ton amour, ta patience, ton soutien, tes relectures et tes heures de mises en pages pour m'aider dans le rush des dernières semaines ! Ça été émotionnellement

---

## REMERCIEMENTS

---

*dur ces derniers mois et tu as toujours été là pour faire du mieux pour m'aider à finir ce chapitre important de ma vie. Merci pour ta présence au quotidien, même si « j't'aime pas » on sait que quand même un peu. Nous allons pouvoir reprendre le sentier de notre vie à deux avec notre Tiskouillette. J'ai de la chance de t'avoir, merci à toi, je t'Woot woot !*

*Enfin, je voudrais terminer par remercier mon noyau, mes essentiels à moi : mes parents et mon frère Christopher.*

*Je tiens à vous remercier tous les trois pour tout votre amour et votre soutien. Vous avez toujours cru en moi, d'ailleurs vous croyez en moi plus que moi-même qui ce qui me donne une force incroyable. Cette force qui me donne l'impression que rien n'est impossible ! Merci de me supporter avec autant d'amour car finalement c'est vous qui avez le plus subi mes doutes, mes peurs de ne pas être à la hauteur durant toutes mes années d'études. Je vous aime !*

*Maman, Chris, je voulais vous remercier de croire en moi ! De prendre soin de moi-même si parfois ce n'est pas toujours facile. J'ai énormément de chance de vous avoir à mes côtés ! Je n'ai pas les mots pour te remercier pour toutes tes relectures maman, d'avoir rasé ton bras pour faire ma manip Kinou ! Et ce ne sont que des exemples. Merci de m'avoir portée à bout de bras ces derniers mois après tout ce que nous avons traversé. Je suis fière de vous, de nous. J'espère que cette thèse marquera une parenthèse pour notre famille, je sais que c'est devenu un objectif familial qui nous tient tous à cœur !*

*Papa, mon petit Pinou, je termine avec toi... le cœur lourd. Je sais que cette thèse te rendait fier. J'aurais tellement aimé que tu sois là pour y assister, je sais que d'une certaine façon c'était le cas. Tu sais papa... on l'a fait, on l'a fait ! Tu me manques.*

*Nous y voilà, cette aventure se termine de tous ces moments et ces apprentissages. Merci pour ce beau chapitre !*

---

*“MERCİ POUR LES ROSES, MERCİ POUR LES ÉPİNES ! ”*  
*Jean d'ORMESSON*

---

## SOMMAIRE

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>5</b>
<b>RESUME GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>AVANT-PROPOS</b>	<b>2</b>
<b>ETAT DE L'ART</b>	<b>5</b>
PARTIE 1 La charge cognitive	5
1. Complexité d'évaluation et quantification de la charge cognitive	5
2. Présentation de la charge cognitive dans l'aéronautique	5
3. Définition de la charge cognitive	6
4. Facteurs influençant la charge cognitive	8
5. Moyens d'évaluation de la charge cognitive	13
6. Conclusion Partie 1	17
PARTIE 2 Approche de la charge cognitive par le contrôle moteur de l'action	19
1. Présentation du système sensorimoteur	19
2. Rappels des modèles du contrôle moteur	20
3. Loi de Fitts comme outil d'analyse multi-échelle du mouvement volontaire	26
4. Influence des contraintes de la tâche sur la loi de Fitts (vitesse, type et référentiel du mouvement)	29
5. Les différentes approches de la loi de Fitts (dynamique et optimale)	30
6. Conclusion Partie 2	31
<b>METHODOLOGIE GENERALE</b>	<b>33</b>
1. Participants	33
2. La tâche	33
3. Protocole	34
4. Dispositifs et espace de simulation de la tâche	38
5. Analyse des données	42

---

<b>DEMARCHE EXPERIMENTALE</b>	<b>53</b>
CHAPITRE 1 : Etude des relations entre métriques de charge de travail et métriques de caractérisation des coordinations motrices dans un référentiel géocentré et égo-centré.	53
1. Matériel et méthodes des expériences 1 et 2	53
2. Hypothèses des expériences 1 et 2	55
3. Résultats des expériences en position	55
4. Discussion chapitre 1	78
CHAPITRE 2 : Etude de l'effet de l'expertise (pilote vs civil) sur les relations entre les métriques de charge de travail et les métriques de caractérisation des coordinations motrices pour le contrôle en position	84
1. Matériel et méthodes	84
2. Hypothèses : expertise	86
3. Résultats des expériences 1 et 2 : expertise	86
4. Discussion chapitre 2	105
CHAPITRE 3 : Etude des relations entre métriques de charge de travail et métriques de caractérisation des coordinations motrices pour un mode de contrôle en vitesse	108
1. Matériel et méthodes	108
2. Hypothèses des expériences 3 et 4	110
3. Résultats des expériences 3 et 4	110
4. Discussion chapitre 3	121
CHAPITRE 4 : Exploration du comportement des métriques de charge de travail et des métriques de coordinations motrices dans un cas écologique de vol en hélicoptère	124
1. Matériel et méthodes	124
2. Métriques et analyses	129
3. Hypothèses	132
4. Résultats des essais en vol	133
5. Discussion chapitre 4	139

---

## SOMMAIRE

---

<b>DISCUSSION GENERALE</b>	<b>141</b>
1. Expérience de laboratoire	142
2. Essais en vol	148
3. Les limites de nos travaux	148
4. Perspectives	149
<b>CONCLUSION</b>	<b>152</b>
<b>MENTION SPECIALE</b>	<b>153</b>
<b>DECLARATIONS</b>	<b>154</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>155</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>165</b>
PARTIE 1 Questionnaire NASA-TLX	165
PARTIE 2 Placements des marqueurs de mocap	168
PARTIE 3 Le membre supérieur et son fonctionnement pour réaliser un mouvement volontaire	168
PARTIE 4 Matériels et méthodes complémentaires pour les expériences de laboratoire	176
PARTIE 5 Matériels et méthodes complémentaires pour les essais en vol	179
<b>TABLE DES FIGURES</b>	<b>191</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>193</b>

---

## RESUME GENERAL

Mots clés : charge cognitive, contrôle moteur, cinématique, EMG, aéronautique, optimisation.

Dans le domaine de la neuro-ergonomie en aéronautique, l'évaluation de la charge cognitive du pilote est primordiale afin de diminuer les risques en vols et d'améliorer la conception des éléments du cockpit (commandes de vols, des assistances au pilotage). La complexité de la tâche de pilotage (aspects sensorimoteurs, physiques et cognitifs) détermine la charge de travail associée aux différentes situations de vol par le biais des qualités de vol. Les qualités de vol peuvent être définies comme la facilité avec laquelle un avion peut être contrôlé par le pilote. Cette notion de facilité peut être évaluée par la charge cognitive du pilote lorsqu'il contrôle le mouvement de l'avion. Il existe différents types de mesures de la charge cognitive tels que des mesures subjectives, physiologiques ou de performances. Majoritairement ceux sont les mesures subjectives qui sont les plus utilisées. L'ensemble de ces mesures de la charge cognitive présentent des avantages et des limites dans l'application aéronautique où l'environnement est très exigeant et contraignant. Ainsi, une approche par le contrôle de l'action du pilote pourrait être complémentaire aux mesures existantes de la charge de travail notamment celles subjectives.

Pour établir une mesure dépendante de l'activité humaine, il est nécessaire d'avoir une compréhension détaillée et à plusieurs niveaux d'analyses des mécanismes de contrôle de l'action pour mieux comprendre à la variation de la charge cognitive. Cette approche pourrait améliorer les limitations de certaines mesures existantes. Dans ce cadre, la loi de Fitts représente un outil intéressant pour étudier le comportement moteur, lors de l'exécution d'un mouvement dans des conditions d'environnements standardisés comportant des variations de charge cognitive. Il est possible avec cette méthode de caractériser les relations entre certains mécanismes du contrôle moteur et des mesures de la charge cognitive associées à la tâche.

Cette thèse vise à fournir des métriques d'évaluation de la charge cognitive à partir de la modélisation, de la caractérisation des mécanismes de contrôle moteur observés à partir de l'activité au manche. Cette étude est menée en étudiant la relation entre les aspects du contrôle moteur (cinématique, électromyographique) et de mesures de la charge de travail (questionnaire NASA-TLX et DIMSS-PM) au travers des différents niveaux de contraintes de l'environnement.

Pour établir cette approche, nous avons les objectifs suivants : (1) caractériser la relation entre la difficulté de la tâche, le contrôle moteur et l'optimalité du mouvement (cinématique, EMG), (2) caractériser la relation entre les différents niveaux d'analyses du mouvement et des mesures de la charge de travail plus classiquement utilisées dans le domaine de l'ergonomie puis de décrire leur sensibilité à la difficulté de la tâche, (3) évaluer nos métriques dans le cadre d'une situation écologique de vol d'hélicoptère.

Pour répondre aux deux premiers objectifs de thèse, nous avons fait quatre expériences en laboratoire. Ces expériences étaient basées sur une tâche classique de Fitts de pointage réciproque effectuée dans différentes conditions. Pour répondre au dernier objectif, nous avons fait des essais en vol qui visaient à faire une manœuvre de l'ADS33 similaire à une tâche de Fitts sur terrain.

## AVANT-PROPOS

---

### *Contexte et problématique de la thèse.*

---

Le 25 novembre 2019 à 18h35 dans l'ouest de Ménaka au Mali dans le cadre d'une mission opérationnelle de renfort aérien, deux hélicoptères de l'armée de Terre de l'ALAT se sont percutés engendrant la mort de l'ensemble des équipages soit 13 militaires. Le rapport du BEA présente plusieurs points d'explication de cet accident :

- Une conscience erronée de la situation au vu de la complexité de la mission car elle se fait en grande partie à vue « *Lors de ces missions, les décisions sont prises sous pression temporelle, sous contraintes et avec les ressources du moment.* ».
- La mission se fait dans un espace aérien non contrôlé ce qui signifie que les pilotes volent sur le principe « voir et éviter » où seules les capacités de détection de l'équipage et les dispositifs de l'hélicoptère sont utilisés pour réaliser la mission.
- La présence de différentes défaillances de surveillances ou d'utilisations des systèmes à disposition des pilotes.
- Une augmentation de la charge mentale des pilotes due à la multiplicité des canaux de communication et l'absence de référence commune dans les conditions de vols.
- Le manque d'expérience de l'un des pilotes dans une situation de pilotage très complexe « *Au regard de la complexité de la situation tactique du moment et de la modeste expérience du chef de patrouille Tigre, un état de surcharge cognitive est probable et peut avoir impacté défavorablement une communication fluide et complète avec son pilote pour assurer la sécurité.* »

Le BEA conclut que la cause de cet accident est « *exclusivement du domaine des facteurs organisationnels et humains* ». Ils évoquent qu'une partie des défaillances amenant à l'accident a été provoquée par une charge mentale élevée des pilotes au vu de la complexité de la mission (condition aérienne, pression des troupes au sol, manque de vision globale de la situation).

Cet exemple montre l'importance vitale d'évaluer la charge cognitive des pilotes dans des conditions de vols complexes. En effet, le pilotage d'un hélicoptère nécessite une activité sensorimotrice exigeante et continue notamment en raison de l'incertitude liée au vol, la proximité d'obstacles dans l'environnement et/ou de certaines situations aérologiques. Les pilotes doivent gérer leur pilotage et les ressources cognitives nécessaires pour contrôler l'appareil. Ceci implique de fortes variations de la charge cognitive associées aux différentes situations de vol. Par conséquent, l'évaluation et la quantification de la charge cognitive sont déterminantes pour concevoir des éléments du cockpit (commandes de vol, assistances au pilotage). Une des façons de définir la charge cognitive des pilotes est la facilité avec laquelle le pilote contrôle son hélicoptère.

Cette facilité est déterminée par les qualités de vols qui sont régies par la combinaison de quatre éléments :

- (1) L'aéronef (i.e. la réponse aux actions du pilote),
- (2) Le pilote (i.e. le niveau de charge cognitive requis pour piloter l'aéronef dans une tâche spécifique),
- (3) La difficulté de la tâche (i.e. la précision requise dans un temps donné),
- (4) L'environnement (i.e. les perturbations atmosphériques, la présence d'obstacles, la qualité de l'information visuelle).

Pour évaluer cette facilité, il existe plusieurs types de mesures pour quantifier la charge cognitive d'un opérateur. Il s'agit principalement de mesures subjectives, telles que le NASA-TLX ou le Cooper Harper. Ces mesures peuvent présenter des avantages et des limites. Actuellement, les mesures subjectives sont les plus utilisées. Ces mesures subjectives ne ciblent pas spécifiquement la composante cognitive. D'autres mesures existent telles que celles physiologiques qui ont l'avantage d'être des mesures continues et objectives basées sur l'observation de la physique humaine. Elles permettent une évaluation tout au long de la tâche. Ce type de mesure est plus complexe à mettre en œuvre et nécessite des compétences spécifiques pour dissocier ce qui est de l'ordre de la réponse physiologique à celle liée à la difficulté de la tâche. Dans le domaine aéronautique, il existe des mesures particulières telle que le DIMSS-PM qui permet d'évaluer la charge de travail en fonction de l'activité de contrôle du manche par le pilote ([Roscoe et Wilkinson, 2002](#)). Néanmoins, elle ne repose pas sur des bases théoriques de la compréhension des mécanismes de contrôle de l'action. Il s'agit d'une mesure empirique créée pour une tâche d'atterrissage spécifique, ce qui présente des limites lorsque le pilote à des stratégies de contrôle en boucle ouverte ([Jennings et al, 2005](#)).

Pour évaluer la charge cognitive qu'implique le pilotage de façon quantitative, l'étude du système sensorimoteur semble être pertinent. Dans le domaine des facteurs humains et de l'ergonomie, il est admis que la surcharge cognitive entraîne une incapacité à faire face à des systèmes complexes extrêmement exigeants. De ce fait, le niveau de la charge cognitive est un critère dimensionnant qui doit être minimisé, pour mieux aider le pilote lors de la conception des systèmes embarqués. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'avoir une compréhension détaillée à plusieurs niveaux des mécanismes de contrôle de l'action.

Un cadre particulièrement intéressant pour étudier la façon dont le système neuro-musculo-squelettique s'adapte aux contraintes spatio-temporelles de la tâche est celui de la loi de Fitts ([Fitts, 1954](#)). Cette théorie est posée dans les termes de la théorie de l'information ([Shannon et Weaver, 1949](#)). Elle est appliquée aux mouvements humains volontairement dirigés et contrôlés et elle fait référence à la capacité de traitement de l'information du système visuo-moteur.

Cette loi, observée dans des conditions et environnements standardisés, permet de prédire la performance motrice. Elle a un intérêt pour évaluer la charge cognitive associée à l'exécution d'un mouvement. Il est possible par cette méthode de caractériser la relation entre certaines métriques du contrôle moteur à partir de l'activité de l'opérateur et la mesure de la charge cognitive associée à la tâche.

C'est dans ce cadre que cette thèse vise à fournir des métriques d'évaluation de la charge cognitive à partir de la modélisation, de la caractérisation des mécanismes de

contrôle moteur observés à partir de l'activité du pilote. Cette étude est menée en étudiant la relation entre les aspects du contrôle moteur (cinématique, électromyographique) et des mesures de la charge de travail au travers des différentes contraintes de l'environnement.

Dans cette thèse, les objectifs étaient (1) de caractériser la relation entre la difficulté de la tâche, des métriques de charge de travail et des métriques du mouvement (cinématique, EMG), (2) de caractériser la relation entre les différents niveaux d'analyses du mouvement et des mesures de la charge de travail classiquement utilisées dans le domaine de l'ergonomie (NASA-TLX), (3) d'évaluer nos métriques dans le cadre d'une situation écologique de vol d'hélicoptère.

Pour répondre aux deux premiers objectifs de la thèse, nous avons fait une première série d'expériences. Elles consistaient à effectuer une tâche de Fitts de pointage réciproque. Les participants étaient placés dans un compromis vitesse/précision et ils devaient contrôler un objet virtuel dans un environnement virtuel. La difficulté de la tâche (i.e. 5 IDs), le cadre de référence (géocentré vs égocentré) dans lequel elle se déroule et le mode de contrôle du manche appliqué (position vs vitesse) étaient manipulés. Nous avons utilisé des métriques objectives (i.e. performance, cinématique, électromyographique) et des métriques subjectives (NASA TLX et DIMSS-PM). Dans ces travaux de thèse, l'optimalité était définie comme la manière dont le système nerveux gère un compromis permettant la réalisation d'une action au moindre coût.

Pour répondre au dernier objectif, nous avons mené des essais en vol qui visaient à faire une manœuvre de l'ADS33 similaire à une tâche de Fitts sur terrain et nous avons 2 ID. Les métriques mesurées étaient les mêmes des expériences en laboratoire afin d'évaluer leur robustesse à la réalité du pilotage.

Afin de mieux appréhender la démarche que nous avons eue pour répondre à cette thèse, nous allons dans un premier temps aborder différents points de la littérature.

## ETAT DE L'ART

### PARTIE 1 La charge cognitive

L'objectif de cette partie est d'apporter des éléments afin d'appréhender la charge cognitive, les mécanismes qui la caractérisent et les mesures qui la quantifient.

#### 1. Complexité d'évaluation et quantification de la charge cognitive

La compréhension, la quantification et l'évaluation de la charge cognitive sont complexes de par l'ensemble des éléments qui composent et influencent la charge cognitive mais aussi selon la façon dont elle est définie. Même si la littérature semble moins confuse sur les mécanismes qui gouvernent la charge cognitive. La charge reste difficile à évaluer et à quantifier. Cette difficulté est due principalement par la prise en compte des facteurs qui influencent cette charge. Dans de nombreux domaines, il est essentiel d'évaluer et quantifier la charge cognitive pour in fine diminuer les surcharges cognitives lors de phases critiques de la tâche amenant dans les cas les plus graves à des dangers/risques pour l'individu.

La quantité de ressources cognitives de l'individu ou l'intensité du traitement cognitif de l'individu pour réaliser une tâche donnée peut être mesurée pour évaluer la charge cognitive.

Également, pour comprendre l'expression de « traitement de l'information », il est primordial de comprendre la notion « d'information ». Dans le cadre de la charge cognitive, l'information cognitive représente le résultat d'un ou plusieurs messages nerveux (sensoriels et/ou moteurs) qui vont transiter jusqu'aux aires cérébrales pour interpréter ce message comme une connaissance. Cette connaissance peut être nouvelle on parlera d'encodage d'une nouvelle connaissance ou elle peut être déjà connue, on parlera ici de récupération de l'information. L'information peut être plus ou moins complexe à traiter selon son contenu informationnel.

#### 2. Présentation de la charge cognitive dans l'aéronautique

Les opérations hélicoptées sont exécutées dans des environnements relativement incertains (i.e. présence obstacles, aérologie complexe, complexité des missions). Ces opérations nécessitent de mobiliser de nombreuses ressources cognitives chez le pilote. Les capacités des giravions (i.e. hélicoptère), telles que le vol stationnaire, le décollage vertical, la maniabilité et l'atterrissage dans des espaces restreints, impliquent une activité de pilotage particulièrement complexe et parfois dangereuse. L'Equipe Internationale pour la Sécurité des Hélicoptères ([International Helicopter Safety Team, IHST](#)) a relevé, entre 2006 et 2011, environ 120 accidents en Europe dont 13 mortels. Ces accidents sont pour 38% dus à une perte de contrôle de l'appareil, soit par une perte de référence visuelle et/ou problèmes météorologiques, soit par une manœuvre délicate ou

excessive du pilote ; contre 11% pour un problème technique. L'Agence Européenne pour la Sécurité Aérienne (AESAs) a déclaré vouloir améliorer la sécurité de 50%, et diminuer de moitié les accidents d'hélicoptères graves et mortels d'ici 2028.

Dans ce contexte, la proportion d'erreurs humaines justifie la nécessité d'explorer les causes de ces accidents. Un des éléments qui pourrait expliquer la proportion d'erreurs est la charge cognitive inhérente à la réalisation de la tâche de pilotage. Du fait des événements extérieurs (aérodynamique, proximité aux obstacles, complexité des missions) et/ou de choix de conception sous-optimaux, une erreur de pilotage peut être engendrée par une augmentation trop importante de la charge cognitive. Durant la phase de vol, le pilote est confronté à de nombreuses informations (auditives, visuelles, proprioceptives) à traiter au travers de multiples interfaces parfois très complexes. L'ensemble du traitement de ces informations peut engendrer une surcharge informationnelle chez le pilote qui n'arrivera pas à traiter l'ensemble de ces informations car ses capacités de traitements sont limitées. L'étude de la charge cognitive lors du pilotage semble primordiale pour concevoir des cockpits visant à améliorer la sécurité des vols et augmenter les performances opérationnelles.

### 3. Définition de la charge cognitive

Pour mieux comprendre comment évaluer et quantifier la charge cognitive, il est indispensable de la définir et de comprendre ce qu'elle implique.

La charge cognitive est étudiée depuis les années 1960 notamment en psychologie cognitive avec les premiers travaux sur l'existence d'un canal unique de traitement de l'information (Welford 1959) qui fait écho notamment à des travaux phares de l'époque sur le traitement de l'information dans le secteur de l'ingénierie (Shanon, 1949) que nous détaillerons dans la seconde partie de l'état de l'art.

Depuis, ces premiers travaux, il y a eu de multiples définitions que nous proposons de détailler ici. Dans le domaine de la psychologie cognitive, la charge cognitive est définie comme ceci « *la charge mentale est au premier abord facile à définir : elle mesure la quantité de ressources mentales mobilisées par un sujet lors de la réalisation d'une tâche* ». (Tricot et Chanquoy 1996). Cette notion serait associée principalement aux propriétés de la tâche et aux capacités de l'individu. D'autres auteurs vont la définir comme un ratio entre la demande de la tâche et les ressources disponibles de l'individu (Cegarra et Chevalier, 2008 ; Wickens et Hollands 2000). Cette vision met davantage en lumière les variations de charge cognitive perçues par l'individu lors de la réalisation de sa tâche. Les ergonomes quant à eux vont apporter la définition de la charge cognitive au travers de contraintes de traitement imposées par la tâche (Sperandio 1980).

Que représentent les ressources cognitives disponibles d'un individu, associées à la réalisation d'une tâche ?

Barrouillet (1996) va définir les ressources cognitives comme l'énergie mentale nécessaire pour effectuer le traitement d'informations. Il apportera une nuance à la définition de la charge cognitive en introduisant le fait que l'effort mental (i.e. la quantité de ressource cognitive nécessaire pour réaliser une tâche donnée) prendrait en compte

les caractéristiques de la tâche et les caractéristiques propres de l'individu. C'est cette définition qui sera utilisée pour définir la charge cognitive durant cette thèse.

Dans les caractéristiques propres à l'individu on entend son niveau d'expertise, son niveau de développement (i.e. augmentation des capacités de traitement de l'information), la stratégie qu'il adopte pour exécuter la tâche et enfin l'état de cet individu au moment d'effectuer la tâche (i.e. fatigue, vigilance, niveau émotionnel, concentration, contraintes physiques).

Il redéfinit ensuite la charge cognitive comme étant à la fois dépendante de facteurs d'origine cognitive et non cognitive : « *la charge cognitive liée à la réalisation d'une tâche donnée comme le niveau d'effort mental (la quantité de ressources) requis par la planification et la mise en œuvre de procédure de résolution donnée chez un sujet dont le niveau de développement et d'expertise dans le domaine concerné sont fixés* ». La définition de la charge cognitive a été affinée en 2010 par Matthews, Warm, Reinerman-Jones, Langheim, Washburn, & Tripp en définissant la charge cognitive comme la quantité réelle de ressources cognitives utilisée par l'individu, elle reflèterait la réaction physiologique de l'individu face à la tâche. Roscoe et Ellis (1990) proposent une autre définition de la notion de charge de travail « *La charge de travail des pilotes est l'intégration de l'aspect mental et l'effort physique requis pour satisfaire les exigences perçues d'une tâche de vol spécifique* ». Cette définition vient définir une nouvelle notion : la charge de travail. A la différence de la charge cognitive, la charge de travail prend en compte l'ensemble des aspects physiques, cognitifs et psychiques.

Les divergences de définitions, ont amené de nombreux chercheurs à essayer de trouver une autre définition pour évaluer la charge cognitive par les caractéristiques de la tâche. Audley, Rouse, Senders et Sheridan (1977) ont développé l'équation suivante :

$$Wi = \frac{di}{ci}$$

Avec  $Wi$  = charge cognitive impliquée pour effectuer la tâche,  $di$  = exigence de la tâche,  $ci$  = la capacité cognitive de l'individu.

Suite à cette nouvelle définition, il a été constaté que la charge cognitive d'une même tâche peut être différente pour plusieurs individus, car elle dépendrait des capacités cognitives de l'individu, de l'effort qu'il fournit pour réaliser la tâche ainsi que la stratégie qu'il va mettre en jeu pour la réaliser. Les notions d'effort cognitif (i.e. charge cognitive) et de stratégie cognitive prennent une place centrale pour étudier la charge cognitive. Ces deux aspects vont amener de nombreux travaux sur la recherche des facteurs qui influencent la charge cognitive dans des situations données (Johannsen, Morat, Rasmussen, Sanders & Wickens 1977).

De façon générale, une grande partie des définitions de la charge cognitive met en évidence l'interaction entre l'opérateur humain, la tâche à réaliser et l'environnement dans lequel elle s'effectue. Il semblerait que la charge cognitive s'organise autour de caractéristiques communes :

- La charge cognitive mobilisée pour réaliser la tâche (i.e. allocations de ressources)

- Les exigences de la tâche (i.e. contraintes, difficulté, pression temporelle ([Hancock et Szalma, 2006](#)), maintien du niveau de performance propre à la tâche).

Ces caractéristiques semblent influencer la charge cognitive et engendrent des variations de la charge cognitive de l'individu.

#### 4. Facteurs influençant la charge cognitive

La compréhension des mécanismes de traitement de l'information est essentielle pour comprendre le fonctionnement de la charge cognitive et l'influence des facteurs sur ses variations.

Pour nous permettre de mieux appréhender la charge cognitive comme « *l'intensité du traitement cognitif mis en œuvre par un individu lorsqu'il réalise une tâche donnée dans un contexte particulier* » ([Chanquoy, Tricot et Sweller, 2007](#)), il semble nécessaire de comprendre les mécanismes associés. L'intensité du traitement cognitif nécessaire à la réalisation d'une tâche dépend de 7 variables ([Chanquoy, Tricot et Sweller, 2007](#)) :

- Le nombre d'informations à traiter ainsi que leurs interactions,
- L'expertise de l'individu face à la tâche (i.e. les connaissances qu'il possède pour la résolution de la tâche),
- La stratégie effectuée pour réaliser la tâche (par exemple ne pas prendre en compte certaines informations ou pondérer les différentes informations),
- L'interférence dans la situation (stress, aspects sensoriels ou émotionnels),
- La proximité entre le traitement des différentes informations sensorielles, cognitives (i.e. proximité des informations de même nature ou proximité des tâches à traiter),
- L'effort consenti par l'individu pour effectuer la tâche (i.e. motivation, fatigue).

Dans cette partie, nous énumérerons uniquement les facteurs liés aux aspects cognitifs. Cependant, il semble essentiel de rappeler qu'il y a de nombreux facteurs physiques, physiologiques et biomécaniques qui viennent influencer la charge cognitive lors de la réalisation d'une tâche. Des travaux ont montré que des facteurs tels que la fatigue ([Brisswalter et al 2002](#)) ou la déshydratation semblent induire des modulations de la performance cognitive des individus. L'effet positif entre ces éléments semblent avoir été démontré tandis que l'effet négatif doit encore être exploré. Dans le cadre de la thèse, seul les facteurs cognitifs seront abordés. Enfin, il semble important de préciser que certains facteurs cognitifs tels que le stress viennent modifier certains paramètres physiologiques qui par effet en cascade affecte la charge cognitive. Les facteurs qui influencent la charge cognitive sont nombreux et multifactoriels, ce qui rends la compréhension de la charge cognitive complexe.

#### 4.1. Facteur lié à la tâche : l'exigence informationnelle

Il existe plusieurs facteurs qui peuvent impacter la charge cognitive lors de la réalisation de la tâche.

Des facteurs inhérents à la tâche tels que la difficulté de la tâche, la pression temporelle ou la complexité de la tâche. La difficulté est relative au traitement nécessaire à l'individu (De Waard 1996), là où la complexité dépend du nombre de variables à contrôler pour réaliser la tâche (Funke, 2001, Liu & Li2012). L'un des moyens existants pour faire varier la difficulté de la tâche est la *Task load* qui représente la quantité d'informations qu'une personne peut traiter en même temps. Elle est caractérisée par les niveaux de difficulté qu'un individu rencontre lors de l'exécution d'une tâche (Zimmerman, 2011) i.e. qu'elle est associée à la difficulté qu'une tâche demande à une personne pour la réaliser (Rahman et al. 2012).

Ces facteurs liés à la tâche vont impacter la capacité de traitement de l'individu notamment en modulant les difficultés informationnelles de la tâche. Pour comprendre l'impact de ces facteurs, il est nécessaire de définir ce que représentent les capacités de traitement de l'individu.

La notion de capacité de traitement est indispensable lorsque l'on parle de charge cognitive. Pour réaliser une tâche donnée, l'individu doit avoir la capacité cognitive nécessaire pour traiter les informations amenant à réaliser la tâche. Cette notion est basée sur l'individu et ne prend pas en compte les caractéristiques de la tâche.

Les problèmes majeurs liés à la charge cognitive sont la sous-charge et la surcharge cognitive. Dans le cas de la surcharge cognitive, l'individu n'est pas en mesure d'allouer la quantité des ressources nécessaires au traitement des informations pour réaliser la tâche.

Des travaux ont montré les capacités limitées du traitement de l'information d'un individu (Moray, 1967) principalement pour les ressources attentionnelles (Broadbent, 1958 ; Wickens, 1984). Dans le cadre de travaux mettant en jeu un paradigme de double tâche, Baddeley (1986) a montré que la mémoire de travail avait une capacité limitée et qu'elle avait un rôle important pour maintenir et traiter l'information.

Une grande partie des travaux portant sur la charge cognitive montrent l'importance de la mémoire de travail pour le traitement de l'information. Pour mieux comprendre ces travaux, reprenons le fonctionnement du traitement d'une information dans une situation de réalisation de tâche (voir Figure 1) :

Nous avons une information sensorielle (stimulus) qui est perçue puis elle est analysée et décodée par la mémoire de travail qui va :

- Soit reconnaître l'information par différents processus attentionnels qui vont permettre de décoder les éléments caractéristiques du stimulus (couleurs, formes, autres) et les intégrer dans la structure des connaissances de l'individu par le stockage dans la mémoire à long terme,
- Soit l'identifier et restituer la connaissance associée pour exécuter la tâche.

Plus précisément, nous avons une première étape d'encodage i.e. d'enregistrement de l'information (dépendante de la mémoire de travail qui est sensible aux capacités attentionnelles). Une deuxième phase de stockage (mémoire à long terme sensible à la qualité de l'encodage). Une dernière phase de récupération de l'information (liée à la qualité de l'encodage i.e. aux indices et repères pris lors de l'encodage).

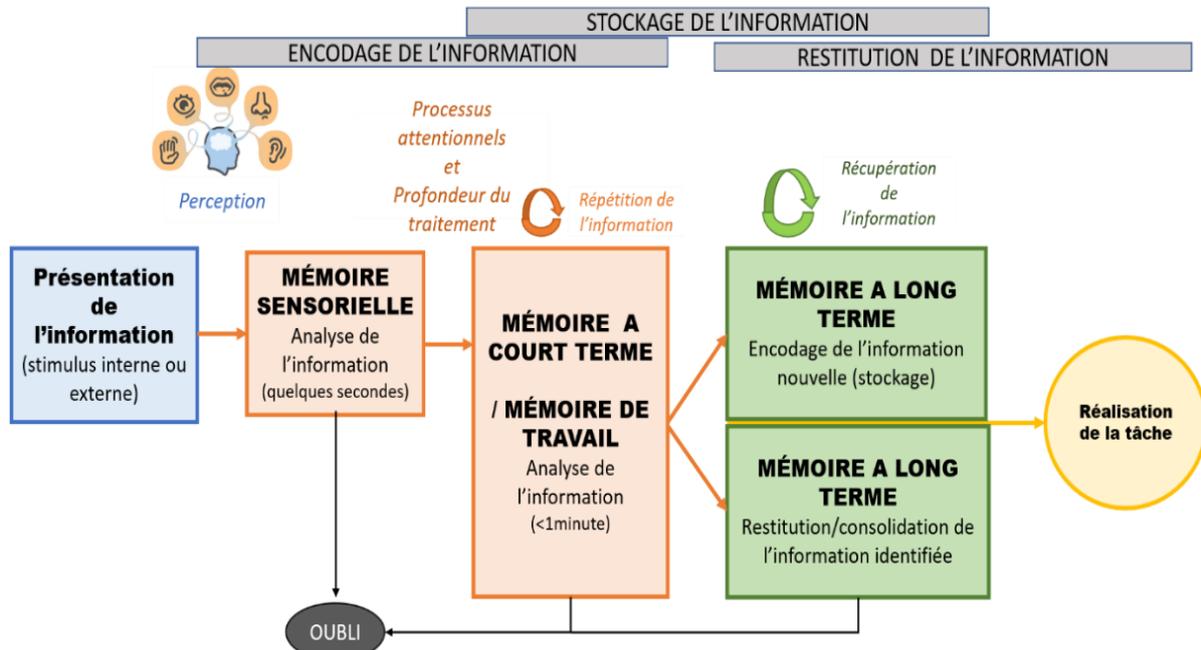


Figure 1 : Représentation graphique du fonctionnement du traitement d'une information par un être humain selon le modèle de Baddeley et Hitch (1974).

Deux théories opposées viennent compléter le fonctionnement du traitement de l'information concernant la manière dont l'information perçue est transmise afin d'être traitée par la mémoire de travail. La première théorie se base sur l'existence d'un canal unique du traitement de l'information. Welford (1959) propose l'existence d'un canal unique avec l'hypothèse que lorsque la charge attentionnelle est trop importante, elle engendre une saturation du canal de traitement de l'information (cas d'une tâche à double stimuli). L'autre théorie repose sur l'existence de multiples canaux de traitements pour chaque modalité sensorielle (Wickens 1984). Pour Wickens (2002), chaque modalité sensorielle posséderait des ressources attentionnelles indépendantes.

#### 4.2. L'influence des contraintes de la tâche

Ces deux théories amènent un autre facteur qui vient impacter la charge cognitive : les contraintes de la tâche. Ces contraintes de la tâche peuvent être dépendantes du format des informations à traiter et/ou de leur nature. Nous avons vu que la difficulté de la tâche impacte la capacité de traitement de l'information et par voie de conséquence la charge cognitive associée à la tâche. La complexité et les contraintes vont également avoir un impact.

Dans le cas du pilotage d'hélicoptère, il apparait indispensable de gérer la charge cognitive de la tâche de pilotage pour minimiser les risques de surcharge cognitive qui sont à l'origine de nombreux incidents et accidents. En aéronautique, il est admis que la charge cognitive est déterminée par l'aisance avec laquelle le pilote va contrôler son

aéronef dans une situation spécifique. Comme nous l'avons abordé, le pilotage d'un hélicoptère est une tâche perceptivo-motrice des plus exigeantes. L'hélicoptère est l'un des aéronefs les plus complexes de par les couplages qu'il faut gérer pour assurer sa maniabilité. Chaque manœuvre nécessite que le pilote contrôle simultanément les axes de roulis, de tangage et de lacet et s'accompagne d'une charge cognitive significatif. Le contrôle de l'ensemble de ces axes implique de devoir gérer son pilotage, sa mission et de faire face à de nombreuses situations de vol (voir Annexe Partie 6 pour les commandes de vol d'hélicoptère).

Pour aider le pilote à contrôler les mouvements de son appareil dans différentes situations, diverses interfaces et assistances au pilotage ont vu le jour dans les cockpits. Ces technologies permettent de donner au pilote des indications sur des paramètres précis entre l'aéronef et l'environnement ainsi que ses contraintes. Majoritairement, ces technologies visent à diminuer la charges cognitive associée à la tâche pour limiter les risques de surcharge cognitive pouvant amener à des accidents ou des risques pour l'équipage. Il est important de quantifier la charge cognitive impliquée par la tâche de pilotage afin de mieux l'évaluer dans le but d'améliorer la conception des nouveaux systèmes intégrant les cockpits et les aéronefs. Cette quantification de la charge cognitive permet d'évaluer l'efficacité de ces nouvelles innovations par les pilotes lors de leur utilisation ou lors de la phase de certification des appareils. L'évaluation de la charge cognitive du pilote est un critère déterminant.

Dans ce cadre de pilotage, nous constatons l'importance de comprendre quels facteurs influencent la charge cognitive et comment ils vont l'influencer. Les facteurs extérieurs de contraintes de la tâche vont directement impacter la performance de la tâche. La réalisation de la tâche et la performance d'exécution peuvent être altérées par la limitation du traitement de l'information, lorsque ces canaux sont saturés ou que les ressources disponibles ne sont pas suffisantes.

[Wickens et Holland \(2000\)](#) ont montré que l'individu avait une performance dégradée pouvant mener au désengagement de la tâche lorsque les ressources disponibles étaient inférieures aux demandes de la tâche. L'apport du modèle multiple de [Wickens \(2002\)](#) a montré que le lien entre la charge cognitive et la performance n'était pas uniquement dépendants de la quantité d'informations, mais aussi de la manière dont les ressources étaient partagées et assignées aux différents traitements. Dans son modèle, la surcharge cognitive dépendrait de l'ensemble des traitements à réaliser, la proximité entre deux tâches et l'allocation des ressources. Il apporte une vision optimale de la gestion des ressources. La surcharge est définie comme un déséquilibre entre les exigences de la tâche et les ressources disponibles de l'individu ([Young et al., 2015](#)). Les phénomènes de sous-charge et de surcharge cognitive entraînent des dégradations de la performance de la tâche avec des déficits attentionnels ([Wilson & Rajan 1995](#)). Au travers de ses travaux sur les contrôleurs aériens, [Sperandio \(1972,1977\)](#) a montré trois éléments importants : (1) lors de surcharge cognitive, la performance de la tâche est altérée, (2) la présence de modulation de stratégie lorsque la charge cognitive augmente, (3) lorsque l'exigence de la tâche est supérieure aux capacités de traitement du contrôleur celui-ci n'est plus en mesure d'effectuer la tâche. La variation de charge cognitive semble influencer la stratégie employée, la performance de la tâche et semble atteindre un seuil à partir duquel l'individu ne peut plus réaliser la tâche.

### 4.3. L'influence de l'expertise

Nous pouvons penser que pour limiter l'impact des contraintes de la tâche, l'expertise pourrait limiter les dégradations de la performance et moduler positivement la charge cognitive liée à la tâche.

L'effet d'expertise est l'un des facteurs qui influence la variation de la charge cognitive. L'expertise prend tout son sens dans la relation entre performance et la charge cognitive. Plus un individu possède de connaissances vis-à-vis d'une tâche, plus celui-ci aura les capacités et les ressources nécessaires pour réaliser cette tâche, ce qui lui permettra de diminuer sa charge cognitive pour réaliser la tâche (Ericsson et Kintsch 1995).

L'ensemble des travaux sur la théorie de l'expertise décrivent les individus experts d'une spécialité comme :

- Possédant des connaissances complexes de différentes natures (perceptives, sémantiques, stratégiques),
- Des capacités attentionnelles supérieures,
- Des capacités de mémoire de travail supérieures afin de gérer la difficulté élevée de la tâche (Chi & Glaser 1988, Farrington-Darby & Wilson 2006).

Le fait d'avoir un niveau d'expertise semble être le fruit de processus automatique qui repose sur peu de demandes attentionnelles rendant le traitement moins coûteux cognitivement. Une personne novice serait quant à elle dans un processus de contrôle, plus coûteux car il se déroule de façon attentionnelle et demande un effort cognitif conséquent et continu (Schneider et Shiffrin 1977). L'expertise permet de moduler la stratégie employée afin de réaliser le meilleur compromis entre la performance d'exécution de la tâche, l'efficacité de réalisation et d'autres facteurs importants tels que la sécurité.

### 4.4. L'influence de l'état de l'individu

Il y a également des facteurs qui sont inhérents à l'individu : des facteurs de charge cognitive (mémoire, limitation des ressources et capacités cognitives) et des facteurs de charge non cognitifs (e.g., stress, émotion, vigilance, biomécanique et physiologique).

Dans les facteurs de charge cognitive, nous avons par exemple les différentes notions existantes sur la mémoire notamment la mémoire de travail.

Concernant les facteurs de charge non cognitifs, il a été montré que lors de la réalisation d'une tâche, le niveau de capacité cognitive estimé par l'individu varie en fonction de l'état dans lequel l'individu se trouve (Lautrey, 2003).

Si nous prenons l'exemple du stress, de nombreux travaux ont montré son effet sur la charge cognitive. Des travaux de 2006 (Shackman, Sarinopoulos, et al 2006) ont montré que lorsque l'anxiété est importante et continue, elle se traduit par une diminution des

ressources disponibles au niveau du cortex préfrontal. Ce qui suggère que les tâches qui demandent des ressources au niveau préfrontal sont particulièrement impactées par l'effet de l'anxiété.

D'autres études ont montré l'effet des émotions positives ou négatives sur la charge cognitive (Raufaste, Daurat et 2004). Ils ont montré plusieurs effets : les émotions positives permettaient de faire un traitement cognitif plus efficace alors que les émotions négatives dégradent les traitements cognitifs.

Il existe aussi d'autres facteurs d'ordre physiologiques (métabolique, nutrition, hydratation, fatigue neuromusculaire) qui viennent impacter la charge cognitive de l'individu ; mais aussi des facteurs biomécaniques (posture, force, troubles musculosquelettique) qui peuvent modifier la charge cognitive et par conséquent la performance cognitive des individus. Ces études ici sont à titre d'exemples pour montrer l'importance de comprendre les impacts de ces différents facteurs sur la charge cognitive.

L'étude de la charge cognitive, que ce soit pour comprendre les mécanismes qui la sous-tendent ou pour comprendre comment certains facteurs l'influence pose une question fondamentale : celle de l'évaluation et la quantification de la charge cognitive.

Nous allons maintenant présenter et détailler les métriques existantes qui permettent d'évaluer et quantifier la charge cognitive.

## 5. Moyens d'évaluation de la charge cognitive

L'évaluation de la charge cognitive est devenue l'un des enjeux majeurs dans de nombreux domaines notamment en aéronautique afin d'améliorer la conception des systèmes.

Les mesures qui évaluent le charge cognitive doivent permettre de quantifier une intensité de traitement cognitif i.e. une grandeur. La charge cognitive est considérée comme un processus multidimensionnel complexe.

Il existe différents types de méthodes (Zhang et al.,2019) pour quantifier la charge cognitive :

- Des mesures subjectives basées sur des échelles de notations de type Likert : c'est la technique la plus commune pour évaluer la charge cognitive (NASA-TLX, SWAT, Beldford workload Scale, Modified Cooper-Harper Rating Scale et le Rating Scale Mental Effort) (Jennings et al., 2005).
- Des mesures objectives (ou physiologiques) par la surveillance de variables physiologiques notamment par diverses variables de pupillométrie, EEG, EMG, ECG, conductance électrodermale (Martin et al., 2019). Ces mesures se basent sur l'analyse de la variation de signaux physiologiques comme la dilatation des pupilles, la variation des battements cardiaque, les modulations des ondes cérébrales, l'évaluation de la quantité de sudation.

- Des mesures de performances notamment avec les performances récupérées lors de double-tâche.
- Des mesures spécifiques ont vu le jour propres à certains domaines comme en aéronautique (Roscoe et Wilkinson, 2002) ou dans le médical (Lowndes et al, 2020).

### 5.1. Mesures subjectives

Les mesures subjectives sont majoritairement utilisées pour quantifier la charge cognitive ou la charge de travail. Il existe de nombreux questionnaires :

- Unidimensionnel permettant de faciliter l'interprétation des résultats. Ils mesurent la charge cognitive de façon directe (Mental effort Rating Scale (Paas & Van Merriënboer, 1993), l'échelle Cooper-Harper (Cooper & Haper 1969), l'échelle de Bedford.
- Multidimensionnels qui visent à mesurer l'ensemble des facteurs qui ont une influence sur la charge de travail comme le NASA-Task Load index (NASA-TLX, Hart & Steveland, 1988), la subjective Workload Assessment Technique (SWAT, Reid & Nygren, 1988). L'un des plus utilisés est le NASA-TLX qui est une mesure multidimensionnelle de la charge de travail. Elle a été utilisée dans divers domaines comme l'aéronautique. Elle comprend plusieurs facteurs afin de prendre en compte un grand nombre de facteurs pouvant influencer la charge de travail.

Pour illustrer ce type d'échelle, voici une explication plus détaillée sur la mesure subjective du questionnaire NASA-TLX. Ce questionnaire comprend 6 dimensions de l'exigence mental jusqu'à la frustration. C'est l'un des questionnaires les plus utilisés. Il est pratique et simple à mettre en place puisque qu'il suffit d'indiquer une valeur sur des échelles de Likert. De façon classique, le NASA-TLX est utilisé en faisant un score global i.e. une moyenne des réponses aux 6 dimensions. Cette moyenne détermine la charge de travail. Plus cette moyenne est importante plus la charge de travail de l'individu est importante. Ce questionnaire évalue des dimensions différentes comme par exemple l'exigence mental ou l'exigence physique. L'aspect multidimensionnel peut être un atout selon la question posée mais peut aussi questionner sur l'usage de cet aspect multidimensionnel lorsque l'on souhaite déterminer spécifiquement la charge cognitive du pilote.

Les avantages de ces mesures sont : d'être facilement mises en place ; de ne pas être spécifiques à une tâche et de permettre des comparaisons entre des tâches différentes. Toutefois, elles présentent certaines limites notamment quant à leur aspect non continu, au moment réalisation de ces mesures (souvent à posteriori de la tâche) et à leur sensibilité aux différents biais cognitifs. Il existe une volonté d'améliorer la précision et la validation de ces mesures (Young et al 2015).

## 5.2. Mesures physiologiques ou objectives

Les mesures physiologiques sont d'un grand intérêt puisqu'elles permettent d'évaluer de façon quantitative et objective la charge cognitive. Elles ont l'avantage d'être continues et de permettre d'étudier les variations de charge cognitive. Nous avons différentes mesures de type périphérique et d'autres de type central.

Les mesures périphériques comprennent l'activité cardiaque (Vogt, Hagemann & Kastner, 2006), l'activité électrodermale, l'activité pupillaire (Kahneman 1966) et l'activité musculaire. Elles se basent majoritairement sur des mesures de variations d'un phénomène biologique. Nous avons principalement la variation du rythme cardiaque avec une augmentation de la fréquence cardiaque lorsque charge cognitive augmente. La variation de la dilatation des pupilles qui caractérise la charge cognitive par une pupille très dilatée. Il existe plusieurs autres types de variations tels que le taux de sudation.

Les mesures centrales quantifient les variations de l'activité cérébrale avec notamment l'électroencéphalographie (exemple : les variations de l'amplitude de l'onde P300), les imageries cérébrales (IRMf, TEP). Ces mesures enregistrent les variations de certaines ondes cérébrales caractéristiques ou des variations d'activations de zones cérébrales spécifiques.

Grand nombre de ces métriques physiologiques sont sensibles à des variations de facteurs extérieurs ou internes qui brulent le traitement de la tâche (par exemple : la lumière ou les émotions, la vigilance). Il est parfois difficile d'interpréter les variations de ces mesures physiologiques pour savoir si elles sont liées à l'effet de la variation de la charge ou aux bruits dus à ces facteurs.

## 5.3. Mesures de performances

Les mesures de performances visent à évaluer la ou les actions effectuées par l'individu. Elles permettent d'étudier les modulations de performances par un critère (temps de mouvement, critère de réussite) qui est spécifique à la tâche à réaliser. Dans le cas d'une double tâche, la mesure principale de performance est la mesure de différence de performance entre la tâche principale et la tâche secondaire. Il est même admis de faire la différence de performance entre deux conditions d'une même tâche.

L'avantage majeur de ce type de mesure est qu'elles n'interviennent pas lors de l'exécution de la tâche et qu'elle n'est pas faite à posteriori de la tâche. Ces mesures de performance ne sont pas toujours fiables. Dans le cas de différence de performance entre les conditions d'une même tâche, il peut sembler difficile de faire la distinction entre une variation de la charge et une autre raison qui induirait une modulation de la performance réalisée. Les individus peuvent mettre en place des stratégies qui vont permettre de réaliser la performance souhaitée même si la charge cognitive associée à la tâche est élevée (cas de l'expertise ou des effets d'apprentissage). Pour utiliser ce type de mesure il est important de bien définir la cause des variations de performances. Ces dernières peuvent être causées par une modulation de la difficulté de la tâche (Task load) ou par des variations de quantité de ressource disponible pour réaliser la tâche.

#### 5.4. Mesures utilisées dans le domaine aéronautique

De nombreuses études tentent d'apporter des innovations pour augmenter la fiabilité de la quantification de la charge cognitive via de nouvelles méthodes plus robustes notamment dans le domaine aéronautique. La mesure de la charge cognitive est un élément clé pour déterminer le comportement et l'état du pilote. Beaucoup de métriques de la charge cognitive en aéronautique se basent sur des études faites sur des simulateurs ou dans des cas précis de manœuvres. Ceci peut représenter une limite à prendre en compte lors de leur utilisation. Actuellement, l'une des méthodes principalement utilisées est le NASA-TLX. Ce questionnaire est une mesure subjective de la charge de travail, qui sert souvent de standard pour valider une nouvelle méthode de mesure de la charge de travail. Afin d'avoir des mesures plus objectives et fiables, l'industrie aéronautique a cherché une meilleure façon d'évaluer cette métrique.

Une autre mesure est celle de [Wilkinson et Roscoe \(2002\)](#) : le DIMSS-PM. Ce dispositif permet de caractériser la charge de travail des pilotes par l'analyse des mouvements du manche de commande (fréquences et amplitude du mouvement). Il est à noter que cette technique a été conçue pour les manœuvres principalement d'appontage.

Il s'utilise en mesurant la quantité de mouvement effectué au niveau du manche. Son principal atout est que c'est une mesure basée sur l'activité de pilotage mais elle peut être discutée puisqu'elle a été créée de façon empirique. Le DIMSS-PM se base sur le calcul du nombre de réversions i.e. des maximum ou minimum locaux sur une fenêtre de temps considérée. Pour déterminer la valeur du DIMSS-PM, il faut calculer le nombre de réversions tout au long du signal en se décalant d'un pas de temps donné. Il existe différentes façons de le traiter : soit par une moyenne de l'ensemble des valeurs du DIMSS-PM, soit en analysant l'évolution de cette valeur au cours du temps. En termes d'interprétation, la charge de travail est élevée lorsque la valeur du DIMSS-PM est grande, i.e. qu'il y a des mouvements à hautes fréquences ou à grandes amplitudes. A contrario, la charge de travail est faible lorsque la valeur du DIMSS-PM est petite i.e. plus la fréquence du mouvement petite.

Dans l'étude de [Jennings et collègues \(2005\)](#), ils ont voulu montrer la pertinence du DIMSS-PM et mesurer la charge de travail du pilote lors de tests de simulation de vol par l'intermédiaire du manche de commande (sa fréquence et l'amplitude du mouvement). Les résultats qu'ils ont obtenus ont permis de valider le DIMSS-PM mais dans des conditions ayant des contraintes proches de la manœuvre d'appontage. Cette métrique semble être une bonne solution quand la charge de travail est caractérisée par les perturbations mais quand elle est déterminée par un changement de système de contrôle, celle-ci ne semble plus suffisamment fiable. [Wilkinson et Roscoe \(2002\)](#) et [Brissette et Mézan en 2005](#) montrent toutefois que même si la comparaison du DIMSS-PM entre de véritables vols et des simulations n'est pas possible, cette mesure semble avoir fournie des informations significatives pendant les essais de simulation. Cette méthode semble favorable pour l'évaluation de la charge de travail des pilotes par cette mesure ([Thorndycraft et Craig, 2004](#)).

D'autres auteurs ont cherché à développer des mesures de la charge de travail en se basant sur des mécanismes cognitifs du pilote. [Mortazavi et collègues \(2018\)](#) se sont placés dans le cadre de la théorie de l'information pour évaluer la charge cognitive sous différents niveaux de défaillance du pilote automatique. Dans leur étude, ils définissent la

charge de travail comme étant la « *proportion de la capacité de traitement de l'information* ». Il est accepté que les changements de charge cognitive impactent directement la performance du pilote. Le pilote automatique permet de diminuer la charge cognitive de l'opérateur. Quand un problème subsiste, la charge cognitive augmente brutalement et le pilote doit y faire face. Ici, ils veulent fournir une procédure qui permet d'observer les effets des différentes difficultés de l'environnement dans les questionnaires subjectifs. Il existe des catégorisations des différents niveaux de charge cognitive afin de pouvoir quantifier cette mesure dans différentes conditions. Ils vont calculer le taux d'informations d'entrée que les pilotes doivent avoir dans le simulateur et ils vont déterminer l'index de difficulté. Ils en déduisent la quantité de débit en bauds (i.e. représente le nombre de symboles transmis par seconde). Ce modèle semble capable d'estimer les informations d'entrée du simulateur et permet d'avoir la possibilité d'ajuster les niveaux de difficulté de la tâche. Le calcul du taux de baud global permettrait d'avoir une mesure des informations générées dans tous les sous-systèmes du simulateur qui peuvent être explicitement en lien avec la charge cognitive du pilote.

D'autres travaux tels que ceux de [Zhang et collègues \(2019\)](#) continuent d'explorer la charge cognitive dans le cadre de la théorie de l'information. Dans leur étude ils ont voulu déterminer la validité de leur modèle (*MWA-IT model*). Dans ce modèle, ils veulent étudier comment certains paramètres (la complexité effective de la tâche, les performances visuelles et l'expérience des pilotes) peuvent prédire la charge cognitive. Cette prédiction de la charge cognitive est un point important d'étude concernant la sécurité en aviation. Par l'intermédiaire du cadre de théorie de l'information, les auteurs veulent faire le lien entre la quantité d'informations à traiter durant une tâche donnée et la quantité de charge cognitive nécessaire à celle-ci. Ils vont utiliser le paradigme de la loi de Shannon (i.e. décrit comme étant la capacité de transmission de l'information avec le bruit propre du signal). Les résultats obtenus après le passage des 9 pilotes sur le simulateur sur une tâche de pilotage au sol, montrent une corrélation avec les mesures du NASA-TLX. Ils ont validé le NASA-TLX avec de bons taux de précisions. Ces travaux montrent l'intérêt de chercher des méthodes de mesure de la charge de travail qui se basent sur des fondements théoriques qui prennent en compte les mécanismes de traitements de l'information du pilote. Pour envisager une telle méthode il semble nécessaire de comprendre comment le système sensorimoteur et biologique du pilote interagit avec son environnement (i.e. cockpit/aéronef), sa tâche de pilotage et aux contraintes auxquelles elles se rapportent (spatiales, temporelles, autres).

## 6. Conclusion Partie 1

Cette partie nous a permis de définir la charge cognitive. Nous avons pu mentionner et décrire la façon dont différents facteurs impactent cette dernière et aborder les mécanismes sous-jacents à la charge cognitive. Nous avons énuméré les différentes mesures existantes qui permettent d'évaluer et quantifier la charge cognitive ainsi que leur limite. De nombreuses revues ([Miller,2001](#)) montrent la multitude des mesures existantes avec leurs avantages et leurs inconvénients. Toutes les limites présentées pour chaque type de mesure montrent parfaitement qu'il n'existe pas de métrique parfaite pour quantifier la charge cognitive peut être par manque d'ancrage à un cadre théorique.

Dans le cadre de ce travail de thèse nous avons cherché à mettre en évidence de nouvelles métriques de la charge cognitive en se basant sur la compréhension des mécanismes de contrôle de l'action. Certaines théories du contrôle moteur placées dans le cadre de la théorie de l'information peuvent caractériser le mouvement selon la difficulté de la tâche et de ses contraintes. Cette approche semble intéressante pour développer des métriques de la charge cognitive basée sur le lien entre l'exigence informationnelle, la performance et l'optimalité du contrôle de l'acte moteur permettant de réaliser la tâche.

## PARTIE 2 Approche de la charge cognitive par le contrôle moteur de l'action

Cette deuxième partie vise à ancrer la mesure de la charge cognitive à la caractérisation du système sensorimoteur par le biais des théories du contrôle de l'action et plus spécifiquement celles en lien avec la théorie de l'information. Nous allons aborder la présentation du système sensorimoteur, des différentes théories du contrôle moteur qui nous permettront de mieux percevoir l'usage de certaines de ces théories en tant qu'outils de compréhension du contrôle de l'action.

### 1. Présentation du système sensorimoteur

Comment le pilote arrive-t-il à répondre à l'ensemble des exigences du pilotage d'aéronef ?

La tâche de pilotage est complexe et multifactorielle ce qui implique une mobilisation cognitive et sensorimotrice. La plupart de nos comportements reposent sur des mouvements complexes, stables, flexibles, qui demandent la coordination de plusieurs muscles, articulations, segments pour répondre aux contraintes d'une tâche dans un contexte environnemental donné. Le pilote doit avoir un contrôle de son action et traiter l'ensemble des informations qui lui parviennent de façon efficace, rapide et précise.

Le système sensorimoteur représente un système de contrôle et de commande composé du système nerveux central (i.e. SNC), des nerfs, des muscles, des récepteurs sensoriels et du système squelettique. Il permet aux êtres humains (et vivants de façon générale) d'établir des relations entre les intentions, les actions, et les conséquences sensorielles de ces actions (Figure 2).

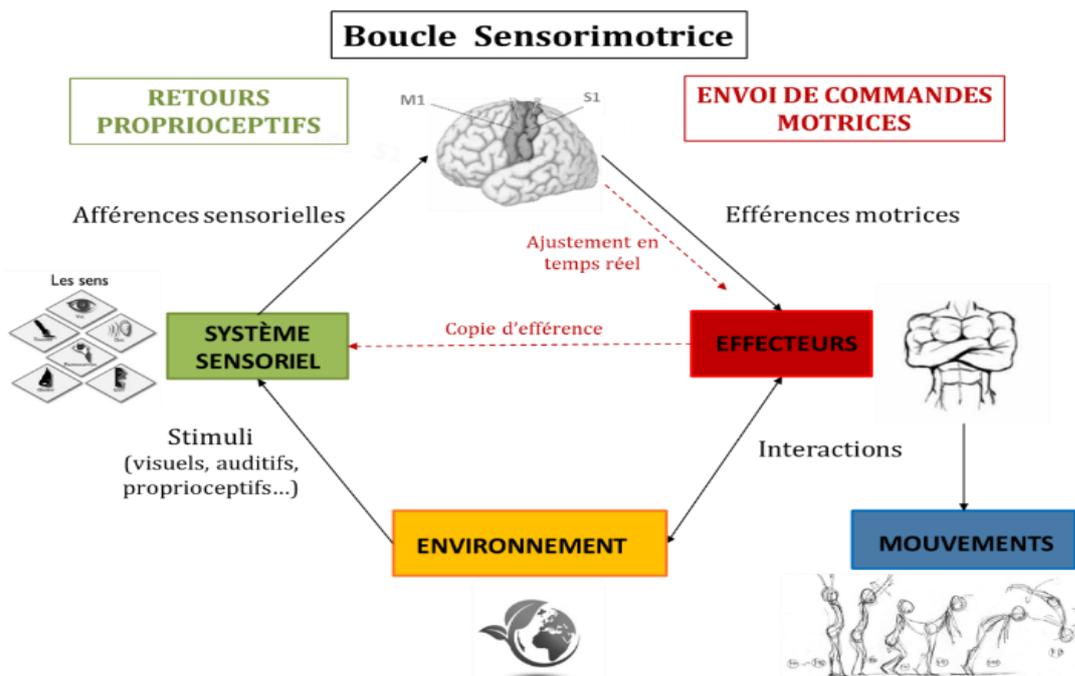


Figure 2: Représentation schématique de la boucle sensorimotrice

Comment fonctionne le système sensorimoteur pour s'adapter et contrôler le mouvement ?

Le fonctionnement de notre système sensorimoteur est caractérisé par une multitude de boucles de rétroaction qui permet à chaque individu de surveiller et d'ajuster sa propre activité. Dans la plupart de nos comportements, lorsque nous marchons, nous interagissons avec des objets, les régulations sensorimotrices mettent en jeu des variables informationnelles et d'exécution qui existent que dans « *the act of doing* » (Varela, Thompson & Rosch, 1996) et qui couplent directement la perception et l'action. Certaines sources d'informations peuvent introduire une rupture de couplage perception-action (Gibson, 1986), et nécessitent des mécanismes cognitifs de plus haut niveau pour déduire l'état de l'interaction entre l'individu et son environnement. La complexité computationnelle de ces inférences détermine la charge cognitive associée à la réalisation de la tâche. Franklin et Wolpert (2011) ont mis en lumière l'existence de plusieurs éléments que rencontre le système sensorimoteur (Tableau 1) pouvant influencer la charge cognitive associée à la réalisation d'une tâche sensorimotrice.

*Tableau 1 : Tableau des différents problèmes rencontrés dans le système sensorimoteur*

<p><u>La non-linéarité</u> <i>Notre système moteur est de nature non-linéaire</i></p>	<p><u>L'incertitude</u> <i>Elle peut être liée à un manque de connaissance de la tâche, de l'état du système</i></p>
<p><u>La non stationnarité</u> <i>Les propriétés du système moteur peuvent changer dans le temps</i></p>	<p><u>La redondance</u> <i>La multitude de <u>possibilités</u> due au nombre important de degrés de liberté du corps pour exécuter ou répondre à une tâche motrice</i></p>
<p><u>Le délai de traitement de l'information</u> <i>La présence d'un délai à tous les niveaux du contrôle sensorimoteur : soit dû à des retards de réceptions des informations afférentes, soit des retards de réponses aux commandes efférentes</i></p>	<p><u>Le bruit biologique</u> <i>Il est présent à tous les niveaux du système, il permet d'estimer l'état interne du corps et l'état externe de l'environnement. Il vient directement interférer avec SNC et limite les capacités de perceptions du système</i></p>

## 2. Rappels des modèles du contrôle moteur

Dans le domaine du contrôle moteur, il existe différents courants de pensées pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le système sensorimoteur tels que les théories cognitives, écologiques et stochastiques. Certaines théories du contrôle moteur peuvent faire le lien entre la charge cognitive et les stratégies/processus moteurs mis en place pour réaliser une tâche donnée.

Pour appréhender ces théories du contrôle moteur il faut comprendre la fonction motrice ce qui nécessite de s'appuyer sur différents niveaux du système moteur : le comportement moteur, la mécanique/propriétés des membres et le contrôle neural du mouvement.

L'organisation et le contrôle des mouvements corporels dans l'espace sont des problèmes complexes dus notamment aux multitudes de degrés de liberté appartenant au système à contrôler. Nous savons que le mouvement peut se définir comme des variations

de position d'un ou plusieurs segments corporels. Il peut être caractérisé par différents paramètres comme l'amplitude, la vitesse de déplacements des segments ou du corps, des exigences de forces et de précision (Hogan et al., 1987). Le contrôle moteur quant à lui est défini comme l'ensemble des opérations réalisées par les structures nerveuses impliquées dans la préparation et l'exécution du mouvement coordonné. Il est organisé de façon hiérarchique. La production du mouvement résulte de la mise en jeu coordonnée des différentes parties du corps et impose de fournir une réponse aux contraintes rencontrées lors de l'exécution de ce mouvement, à la fois internes et externes. (Voir annexe partie 4 pour le détail du membre supérieur et des mécanismes du mouvement).

Le lien entre contrôle moteur et la charge cognitive associée à une tâche repose en grande partie sur la gestion de l'information et de son traitement à la fois par les propriétés de la tâche et par les caractéristiques de l'individu. Il est possible d'aborder la charge cognitive au travers de différentes théories du contrôle moteur.

Les *théories cognitivistes* qui postulent pour l'existence d'un programme moteur, « schéma, base de connaissance ou représentations qui seraient stockés en mémoire à long terme » qui déclencherait, piloterait et corrigerait le mouvement. Par exemple, pour Sherrington, Schmidt il y aurait des relations indirectes entre la perception et l'action et ces relations seraient médiées par des structures élaborées temporairement et/ou stocker au niveau central.

A contrario, les *théories écologiques* postulent pour l'existence d'une relation directe entre la perception et l'action ainsi que la présence de propriétés d'auto-organisation du système moteur (avec notamment Gibson, Kelso). Autrement dit, les actions seraient des coordinations motrices temporaires, émergentes qui seraient des réponses d'un système (ici humain) à une demande fournie par l'environnement. Il n'y a pas besoin d'avancer l'existence de représentations en mémoire long terme pour expliquer le mouvement. Au sein de ce courant de pensée, se trouve la théorie des systèmes dynamiques qui se base sur la compréhension des coordinations motrices intersegmentaires et de leurs modulations. Cette théorie essaye d'expliquer l'influence mutuelle des éléments d'un même système qui donnerait des états (i.e. mouvements) spontanés stables et économiques (Turvey et al., 1980). Dans ce cadre, on met en lumière l'importance des propriétés propres du système (masse, inertie, rigidité) ainsi que de l'influence des contraintes de la tâche et ce qu'elles engendrent sur le dynamisme de la coordination du mouvement. En particulier avec les travaux Kelso (1884) sur les synchronisations de tâches bimanuelles. Ces notions de coordinations reposent sur des invariants qui sont des signatures de la coordination ainsi que des états attracteurs (i.e. représentent la solution stable, propre au système, vers laquelle il converge spontanément avec le temps) et/ou répulsifs (i.e. représente un état périodique qui n'est pas stable). Il existe un état de bi-stabilité où les deux attracteurs coexistent. Par le biais de forces stochastiques (i.e. bruit biologique ou redondance musculaire, articulaire), le système tend à retrouver un état stable répondant aux contraintes de la tâche dans l'environnement donné.

Ces théories montrent les différentes stratégies motrices mises en place ayant pour but l'obtention d'un mouvement stable. Ce comportement stable souhaité est le résultat du choix d'une stratégie permettant le traitement optimisé du mouvement à réaliser et du traitement de l'information afin de réaliser le mouvement. Il existe deux principales stratégies : le contrôle proactif ou rétroactif du mouvement. Le contrôle proactif (en

boucle ouverte ou feedforward) c'est un contrôle qui ne prend pas en compte une information retour. Le second est en boucle fermée (feedback) c'est un contrôle qui base la réalisation des actions sur le retour d'information. Le choix de la stratégie motrice pour obtenir un mouvement stable en réponse aux contraintes de l'environnement fait référence à la volonté du système sensorimoteur à trouver la réponse la plus optimale (i.e. la moins coûteuse) pour réaliser le mouvement.

La théorie du contrôle optimal par rétroaction constituerait ce lien entre les différents niveaux du système moteur. Elle permettrait d'interpréter la base neurale du mouvement et fournirait un modèle intéressant pour décrire le système moteur (Scott, 2004). La variabilité des mouvements effectués résulterait de l'interaction entre les bruits sensoriels et les bruits d'exécution motrice dans un système optimal contrôlé par rétroaction (Guignon et al, 2008). En raison de la redondance qui caractérise le bras humain, le nombre de trajectoires articulaires admissibles vers le but d'une tâche est généralement infinie. Cette théorie est très pertinente pour comprendre le système sensorimoteur au travers des procédés d'optimisation biologique. Pour réaliser un mouvement, le système musculosquelettique offre une redondance cinématique, dynamique et d'actionnement avec l'utilisation de plusieurs degrés de liberté. Elle vise à essayer de résoudre des problèmes de redondance du système sensorimoteur par des critères d'optimalité. Le système nerveux central (SNC) choisit certains critères parmi de nombreuses possibilités afin d'optimiser le mouvement (i.e. diminuer le coût). Les mouvements naturels sont optimaux après une phase d'apprentissage. L'optimalité du mouvement pourrait être exprimée par l'optimisation de la combinaison de fonction de coût, préalablement choisi par le SNC pour coordonner les différents degrés de liberté nécessaires à la tâche.

Cette théorie cherche à répondre à la question : « Quelles fonctions de coûts le système nerveux central optimise pour coordonner les différents degrés de liberté nécessaires pour produire un mouvement ? ». Dans ce cadre, une fonction de coût constitue un critère biomécanique, sélectionné par le SNC, pour être minimisé pendant l'accomplissement d'un mouvement donné (Albrecht et al, 2013). La plupart des modèles de contrôle optimal existant dans la littérature (Cheffi et al, 2015) prédisent des trajectoires de mouvement en optimisant diverses fonctions de coût.

Ces fonctions permettent de modéliser l'ensemble des combinaisons en termes de changement de force, d'énergie ou de critère de couple.

$$C(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i$$

Avec  $C_i$  = fonction de coût plausible (critère choisi),  $n$  = nombre de critères choisi,  $\alpha_i$  = poids associé à la fonction de coût

Les travaux de Berret et collègues (2011) ont démontré que la plupart de nos mouvements résident dans une combinaison de fonction de coûts complémentaires liée à la consommation d'énergie mécanique et à la fluidité des articulations. Ils ont suggéré l'existence de 8 critères d'optimalité les plus classiquement cités dans la littérature de nature : cinématique, dynamique, géodésique, énergétique, musculaire et neural (voir Tableau 2).

*Tableau 2 : Tableau récapitulatif des fonctions de coûts existants en fonction de leur nature.*

Nature du critère d'optimalité	Cinématique	Dynamique	Géodésique	Energétique	Musculaire	Neural
Critères (référence)	-Minimum hand jerk -Minimum angle jerk -Minimum angle acceleration	-Minimum torque change -Minimum torque		-Minimum of work of torque -Total travail absolue	-Co-activation -phénomène d'inactivation	- Minimum effort model

Cinématique : Ce modèle représente le fait de maximiser la fluidité du mouvement.

Dynamique : Ce modèle représente le fait d'optimiser le choix du mouvement par rapport à l'énergie cinétique nécessaire au mouvement.

Géodésique : Ce modèle suggère que SNC sélectionne le plus court chemin de configuration spatiale de collecteur Riemannian<sup>1</sup> avec respect de la métrique de l'énergie cinétique. Il est utilisé pour séparer et déterminer les caractéristiques géométriques et temporelles du mouvement.

Energétique : Ce modèle représente le coût qui est reliée à la minimisation du travail articulaire.

Musculaire : Ce modèle souhaite minimiser le travail musculaire.

Neural : Ce modèle désigne le fait d'optimiser la quantité de l'activité des neurones moteurs durant un mouvement poly-articulé.

En terme musculaire, le niveau de co-contraction est un critère qui a été utilisé par [Loeches de la Fuentes et collègues \(2014a et 2014b\)](#) pour caractériser l'optimalité du mouvement au niveau musculaire. La co-activation représente l'activation simultanée des muscles agonistes et antagonistes lors du mouvement, elle peut être défini comme « l'activité des muscles antagonistes survenant lors d'une contraction volontaire en conditions statiques ou dynamiques. En se contractant, ces muscles antagonistes génèrent un couple de force qui s'oppose à celui produit par les muscles agonistes. » ([Remaud et al, 2007](#)). [Gribble et collègues \(2003\)](#) ont mis en évidence la relation entre co-contraction et précision pour des mouvements discrets. Dans leurs travaux, ils ont montré que la co-activation augmentait lorsque la difficulté de la tâche augmentait i.e. que plus la précision augmentait plus la co-activation augmentait aussi. Ceci leur a permis de déduire une relation entre le niveau de co-activation et le niveau de précision du mouvement. Ce type de stratégie permet d'augmenter la raideur articulaire de l'effecteur et, par voie de conséquence, la précision du mouvement. Ce critère énergétique permettrait d'évaluer l'optimalité du mouvement humain lors de la tâche dynamique de pilotage ainsi que la plus-value d'une assistance haptique. Par le biais de cette théorie, nous pouvons tenir compte de nombreux critères qui sont soutenus par des théories citées plus haut. Les principes sur lesquels notre SNC s'appuie pour atteindre un certain comportement moteur ne sont pas encore clairs. En effet, de nombreux facteurs (cognitif, physiologique, biomécaniques) peuvent faire varier ces comportements moteurs et par conséquent ils peuvent induire des difficultés pour l'évaluation de l'optimalité du mouvement. L'impact des facteurs biologiques et biomécaniques peuvent tout autant que les facteurs cognitifs

<sup>1</sup> Branche de la géométrie différentielle avec des concepts fondateurs de variétés de géométries et de courbures. Les géodésiques permettent de répondre à la recherche des chemins les plus courts entre deux points.

venir faire varier le comportement moteur. Les phénomènes de fatigues musculaires, métaboliques, les aspects anatomiques, les caractéristiques des muscles et le type de contraction, les contraintes de la chaîne musculaire lors de la réalisation du mouvement représentent une liste non exhaustive d'un ensemble de facteurs qui vont venir impacter l'optimalité du mouvement pour réaliser un mouvement donné. Dans la plupart des cas, le véritable critère de performance suggérerait que les mouvements ne sont pas le résultat de la minimisation d'une fonction de coût unique mais impliquerait un ensemble de fonctions de coût correspondant à ce que le système sensorimoteur essaie d'atteindre (Todorov, 2004) et résulterait d'une combinaison des exigences externes de la tâche avec des contraintes internes.

D'autre part, la théorie optimale stochastique de la rétroaction (Todorov et Jordan 2002 ; Todorov, 2004) vise à comprendre le système moteur par ses incertitudes. Cette vision stochastique permet d'appréhender de manière quantitative un mécanisme incertain, en observant des séries d'évènements (Rose, 2012). Cette approche postule, comme le pensait Bernstein (Bernstein, 1967) concernant les degrés de liberté, que la variabilité et la redondance sont intrinsèque au système sensorimoteur. Les systèmes dynamiques et stochastiques s'appuient sur des procédés d'optimisation qui incluent l'ensemble des niveaux du contrôle moteur (Campos et Calado, 2009). Dans ce cadre, Todorov et Jordan (2002) ont développé une théorie du contrôle optimal stochastique, qui apporte des nuances aux données comportementales par rapport aux visions plus traditionnelles du contrôle optimal inverse (Flash et Hogan, 1985 ; Uno et al 1989). Les comportements sensorimoteurs sont flexibles i.e. il existe des ajustements par les boucles de contrôle pour exploiter les possibilités du système afin de répondre stratégiquement à une tâche et à ses exigences spécifiques. Les phénomènes de variabilités motrices - conséquences de l'incertitude, du délai ou de la redondance du système- peuvent être expliqués par le principe d'intervention minimal (*the minimal intervention principle*) (Todorov et Jordan, 2002 ; Todorov 2004). Ce principe repose sur le fait que ces ajustements ne surviennent que lorsqu'ils sont pertinents dans le but de maximiser les performances motrices. Leur modèle de contrôle optimal stochastique est le premier à intégrer le bruit biologique et à le combiner à l'estimation de l'état du système ainsi qu'au contrôle de la rétroaction. L'intégration du bruit biologique permettrait de résoudre, de façon plus appropriée, les problèmes de redondance en ligne<sup>2</sup>. La loi de contrôle de rétroaction est définie par Todorov (2002, page 1229) comme « *The optimal feedback control law  $u = \pi^*(t,x)$  is the time-varying mapping from states into controls that minimizes the total expected cost.* ». Dans cette vision, les auteurs suggèrent l'importance de la variabilité du contrôle moteur. L'incertitude du système sensorimoteur semble être indispensable pour permettre l'optimalité du mouvement. La redondance du système apporterait des corrections adéquates aux mouvements et des adaptations plus appropriées aux modes de coordinations. Todorov et Jordan (1998) montrent l'importance de l'intégration du bruit dans la modélisation des mécanismes sensorimoteurs (i.e. rétroaction, mode de contrôle, perturbations diverses). Par exemple, la prise en compte du bruit pour l'estimation de fonction de coût lors de mouvements oculaires semble permettre la prédiction de la performance optimale de la main. Lorsqu'on analyse le modèle optimal stochastique dans le paradigme de la loi Fitts (défini

---

<sup>2</sup> Le contrôle des mouvements en ligne se fait par l'intermédiaire de feedback de plusieurs modalités (visuelles, auditives, proprioceptives) au cours du mouvement, ce qui joue un rôle majeur dans la correction du mouvement.

ci-dessous), on peut remarquer que les mouvements rapides impliquent que le bruit du système sensorimoteur est dépendant du contrôle. Les travaux de [Schmidt et collègues \(1979\)](#) et [Todorov \(2002\)](#) ont démontré, par le biais de différentes tâches de pointages, l'importance du contrôle utilisé. Ils ont fait des analyses des trajectoires optimales par le biais de modélisation du contrôle moteur pour étudier les mécanismes sous-jacents à l'optimalité du mouvement. De leur analyse, ils ont voulu comprendre l'influence des types de contrôle associée aux mouvements et l'importance du bruit biologique. A partir de ces travaux, des modèles d'optimisation ont émergé dans le cadre des mouvements d'atteintes s'inscrivant dans un conflit vitesse-précision ([Meyer et collègues \(1988\)](#)<sup>3</sup>, [Hoff \(1992, 1993\)](#)<sup>4</sup>). Il semble pertinent de prendre en compte ces aspects lors de la compréhension des mécanismes régissant l'optimisation des mouvements impliqués dans la réalisation d'une tâche motrice contraignante telle que pointer ou contrôler un périphérique d'interaction de type joystick.

L'ensemble de ces théories montre que le SNC semble s'être organisé pour permettre d'effectuer un mouvement stable en s'adaptant aux contraintes de l'environnement. Cette organisation dénote une volonté :

- Optimiser le mouvement,
- Limiter la charge cognitive associée à la réalisation de la tâche.

Les travaux précurseurs de [Paillard \(1989, 1991\)](#) ont mis en évidence l'existence d'une relation entre le système moteur et la cognition dans la réalisation d'une tâche notamment avec la notion de « pénétrabilité cognitive du système sensorimoteur ». Des travaux plus récents de [Sicre et al \(2008\)](#) ont modélisé un modèle de contrôle qui prend en compte les aspects sensorimoteurs et cognitifs. Le lien entre contrôle cognitif et le contrôle moteur vise à être de plus en plus investigué pour mieux comprendre la relation ou la pondération de ces deux contrôles quant au rôle qu'ils jouent lors de la réalisation d'un mouvement.

De façon indirecte, [Fitts \(1954\)](#) a établi une relation entre la quantité d'information à traiter pour l'atteinte d'un objectif et la performance sensorimotrice réalisée pour atteindre cet objectif. Il a créé l'un des paradigmes les plus robustes qui suscite toujours un intérêt majeur pour comprendre le contrôle moteur : le paradigme de la loi de Fitts. Cette loi se place dans le cadre de la théorie de l'information. Cette théorie est née dans le domaine des sciences de la communication. Elle se base sur une théorie de probabilité permettant de quantifier un taux d'information afin de satisfaire une distribution statistique précise ([Shannon et Weaver, 1949](#)). La loi de Shannon est décrite comme étant la capacité de transmission de l'information avec le bruit propre du signal. Au travers de sa loi il établit qu'une source transmet un message à un émetteur qui va transmettre le

---

<sup>3</sup> Modèle de Meyer : Théorie de la variabilité de l'impulsion motrice. Relation déterminant le MT en fonction de l'ID à l'intérieur de la phase initiale d'impulsion (i.e. spécifié pendant la phase de programmation du mouvement) ([Meyer et al., 1988](#) ; [Meyer, 1990](#)).

<sup>4</sup> Modèle de Hoff et Arbib: L'atteinte d'un cible repose sur la comparaison en ligne de la position de la main par rapport à celle de la cible (modèle prédictif = éviter les problèmes de délais des traitements des réafférences). Quand la vitesse augmente, la prédiction diminue de la précision de la main par (1) diminution de la fréquence d'échantillonnage, (2) accroissement de la variabilité motrice) ([Hoff & Arbib, 1992/1993](#)).

message codé par un canal (qui subit du bruit) qui va à son tour transmettre le message décodé au récepteur qui enverra le message au destinataire. A partir de ce schéma, il va définir (1) le théorème 17 qui indique que la vitesse maximale de transmission de l'information par un canal de communication en présence de bruit est dépendante de la capacité du canal et (2) la notion d'entropie (i.e. une mesure du degré d'incertitude) d'une source comme étant la quantité d'informations dont le récepteur a besoin pour déterminer message sans ambiguïté. Autrement dit, plus la quantité d'information est petite plus le message reçu par le récepteur sera incertain et donc l'entropie sera grande. Ces notions sont le cœur de son paradigme qui permet de mieux comprendre la gestion de la quantité d'information pour réaliser une tâche. Cet aspect de gestion de la quantité d'information est indispensable lorsque l'on souhaite déterminer la charge cognitive inhérente à la réalisation d'une la tâche sensorimotrice.

### 3. Loi de Fitts comme outil d'analyse multi-échelle du mouvement volontaire

Un cadre particulièrement intéressant pour étudier la façon dont le système neuro-musculo-squelettique s'adapte aux contraintes spatio-temporelles de la tâche est celui de la loi de Fitts (Fitts, 1954 ; Fitts & Peterson, 1964). Posée dans les termes de la théorie de l'information (Shannon et Weaver, 1949) et appliquées aux mouvements humains volontairement dirigés et contrôlés, elle fait référence à la capacité de traitement de l'information exprimée en bits. (Fitts, 1954 ; Fitts & Peterson, 1964). La loi de Fitts (Fitts, 1954) est basée sur la théorie de l'information et plus précisément sur le théorème 17 de Shannon. La théorie de l'information est née des sciences de la communication par Shannon et Weaver et elle est basée sur des probabilités. Ils établissent cette théorie sur le fait qu'un système de communication comprends un émetteur qui envoie un message via un canal de communication (comprenant plus ou moins de bruit) à un récepteur. Dans ce système de communication, ils suggèrent que plus la quantité d'informations transmise par le canal est grande, plus le temps de traitement de l'information sera long. Ils en déduisent un théorème qui est le théorème 17 de la théorie de l'information qui indique que la vitesse maximale de transmission de l'information par un canal en présence de bruit est dépendant de la capacité du canal. Cette capacité permet de déterminer la capacité de traitement d'un système de communication en bits par seconde. Cette théorie a été transférer au contrôle moteur par Paul Fitts (Fitts, 1954) au travers de la loi de Fitts. Cette loi reflète une analogie entre la théorie de l'information et le comportement humain. Fitts va considérer le cerveau comme un système de communication avec une capacité de traitement limité. Il va déterminer la capacité de traitement du canal visiomoteur au travers d'une tâche de pointage qui implique un conflit vitesse/précision. Pour cela, il va transposer cette théorie à la tâche de pointage en établissant que plus la précision requise pour faire le pointage est importante, plus la quantité d'information transmise par le canal est grande, donc plus le temps de traitement pour réaliser le pointage est long. Autrement dit, il va créer une mesure qui est le temps de mouvement i.e. le temps d'exécution du pointage qui représente la capacité de traitement du canal visio-moteur. Il fait varier la difficulté de la tâche en manipulant l'exigence informationnelle de la tâche par des modulations soit de la taille des cibles  $W$  ou de la distance  $D$  entre les cibles.

Selon Fitts, les mouvements dirigés vers une cible sont exprimés sous la forme de la loi de Fitts. Cette loi représente un modèle robuste de la coordination visiomotrice dans

des conditions et environnements standardisés et qui permet de prédire la performance. Elle est largement utilisée dans divers domaines scientifiques, même si les applications sont parfois divergentes entre les champs et créent des débats, notamment sur l'application faite en IHM ([Errol E. Hoffmann, 2014](#)). Selon le domaine, cette loi permet soit d'évaluer la capacité du système de guidage et de correction de l'action (neuroscientifique), soit de tester l'effet des contraintes (ergonomie), d'évaluer des innovations dans le cadre des IHM ou de la psychologie. Elle suit un modèle de régression linéaire simple<sup>5</sup>. Elle peut être utilisée en prédiction (i.e. utilisation du temps de mouvements vers la cible via le coefficient d'amplitude et la tolérance) ou en mesure (i.e. utilisation du débit, du ratio entre indice de difficulté et le temps de mouvement, la performance humaine). A partir des études de [Fitts en 1954](#), elle est décrite comme : « *le temps d'acquisition d'une cible (ou TM temps du mouvement) croit linéairement avec la quantité d'information spécifique à la cible, qui définit l'indice de difficulté de la tâche (ID) avec a et b des constantes caractéristiques (de contraintes) de l'individu* » et par l'équation :

$$TM = a + bID$$

Avec  $ID = \log_2\left(\frac{2D}{W}\right)$  ; D = distance entre le centre des deux cibles ; W = la largeur de la cible.

[Shannon et Weaver](#) ont montré en 1949 qu'il faut respecter le théorème 17 de la théorie de l'information, qui stipule que le débit informationnel I d'un système de transmission bruité de bande passante C et de rapport signal (S) / bruit (B) revient à :

$$I = C \log_2\left(\frac{S}{B} + 1\right)$$

Cela reviendrait à en déduire la quantité d'information pour se déplacer d'une distance D avec une tolérance de W.

$$ID = \log_2\left(\frac{D}{W} + 1\right)$$

La quantité d'information qu'un individu peut traiter par unité de temps est appelée l'indice de performance (IP) et est représentée par le rapport ID (en bits) sur TM (en secondes). L'IP est une mesure de la capacité de traitement du système moteur dans les tâches unidimensionnelles ([Mackenzie, 1992](#)). Fitts a interprété cette loi comme la capacité de traitement de l'information du système moteur à générer un type de mouvement parmi une multitude de mouvements possibles.

Elle est considérée comme l'une des lois les plus robustes dans le domaine du contrôle moteur et a été validée et étudiée dans de nombreux cas comme :

- Le mouvement du membre supérieur (mouvements discrets, mouvements continus),

---

<sup>5</sup> Le modèle de régression linéaire est un modèle qui « cherche à établir une relation entre une variable dite expliquée, et une ou plusieurs variables dites explicatives » ([définition Wikipédia](#)).

- Le mouvement des membres inférieurs,
- Sur plusieurs dimensions (1D, 2D, 3D),
- A travers une multitude de dispositifs (stylet, manches, interface virtuelle ...),
- Dans l'air et dans l'eau.

Cette loi opposerait deux courants de pensée vis-à-vis de la motricité : l'une promeut le contrôle itératif (i.e. rétroaction sensorielle lors du geste, généralement en fin de mouvement, feedforward), l'autre le contrôle proactif (i.e. prédétermination du mouvement avant l'exécution du geste, phase initiale du mouvement, feedback). La loi de Fitts peut être interprétée différemment selon le point de vue avec lequel on l'analyse. D'un point de vue itératif, les erreurs sont présentes pendant le mouvement et elles sont dépendantes de la capacité du traitement du canal. Le rôle des rétroactions diminue la performance du mouvement et elles jouent un rôle dans la phase de décélération du mouvement (Crossman et Goodeve, 1983). Ce contrôle est répétitif car les rétroactions sont traitées avec un délai. Également, il peut être considéré comme discontinu (Schmidt et Lee, 1999) et répétitif (Crossman et Goodeve, 1983). Il y aurait une correction motrice qui s'effectue de façon discontinue et fréquente lors de la production de la commande motrice en fonction des rétroactions ou des corrections déjà effectuées. Ici, la performance de la tâche (i.e. le temps de mouvement) est dépendant du nombre de sous mouvements correctifs effectués pour réaliser la tâche. Autrement dit, la capacité de traitement serait dépendante de la capacité de traitements des réafférences sensorielles (i.e. la capacité des réafférences limiterait la performance du mouvement en fin de geste). La principale limite dans cette manière d'interprétée la loi de Fitts est que ce type de contrôle implique que l'on puisse prédire la temporalité du premier sous mouvement et qu'il existerait un lien entre la précision du mouvement et le nombre de sous mouvement correctifs pour réaliser l'atteinte de la cible. Or, il n'existe pas de consensus sur ces points. D'un point de vue proactif, la relation de Fitts serait intrinsèque à la phase initiale d'impulsion du mouvement donc elle serait comprise pendant la phase de programmation du mouvement. Cette hypothèse se base sur la théorie de la variabilité de l'impulsion motrice (Schmidt ; Meyer). Dans cette théorie, ils expliquent que lors d'un mouvement dirigé, la phase initiale d'impulsion est programmée pour que le point final atteigne la cible. L'impulsion = masse x vitesse, donc l'impulsion représenterait l'intégrale de la force en fonction du temps. Ainsi Schmidt considère que la variabilité du mouvement augmente proportionnellement avec la quantité de force initiale du mouvement et la durée initiale d'application de la force du mouvement. Ici, les erreurs de pointage seraient représentatives de la variabilité de la commande motrice lors de l'impulsion initiale du mouvement. Autrement dit, la variabilité finale du mouvement à la cible correspond au bruit du système neuromusculaire (SNM). Sachant que le bruit biologique associé au SNM peut être défini comme des informations qui se superposent au signal « principal ». Il considère dans cette vision que la vitesse du mouvement est proportionnelle à l'augmentation de la variabilité. Cette interprétation suggère que le nombre de sous mouvements correctifs pour atteindre la cible doit être limités ou nuls pour optimiser la vitesse et donc la variabilité du mouvement. Ces deux interprétations possibles montrent qu'il existe plusieurs interprétations possibles de la loi de Fitts. Actuellement, certaines visions ne cherchent plus à diviser ces deux courants de pensées mais plutôt à avoir des visions plus globales ou alors des visions qui se base sur une notion comme celle d'Harris et Wolpert avec une interprétation par le bruit biologique.

Dans les revues de littérature faites par Soukoreff et MacKenzie en 2004 et Bonnet Blanc (2008) sur l'évolution de la loi de Fitts, ils montrent l'étendue de l'usage de ce paradigme et des modifications qu'il a connues. La revue de Mackenzie (1992) permet de mieux appréhender l'usage de cet outil dans le domaine des interactions en IHM avec des modèles phares sur lesquels s'appuient les recherches actuelles dans ce domaine particulier. Le contexte théorique de Fitts fait toujours débat aujourd'hui, avec la formalisation du calcul, mais aussi les violations de certaines valeurs telles que le temps de mouvement (TM), l'ID (indice de difficulté) et l'IP (indice de performance) qui sont valides à un taux maximal de transmission i.e. lorsque le mouvement est réalisé à vitesse max. Ces valeurs sont des incontournables de cette loi.

Au fil des recherches, cette loi a connu de nombreuses adaptations afin d'être validée dans un grand nombre de cas divers et variés étant très largement utilisée dans les domaines ergonomiques, psychologies ou facteurs humains (IHM). Encore actuellement, de nouvelles formulations sont encore étudiées pour l'appliquer à d'autres cadres.

#### **4. Influence des contraintes de la tâche sur la loi de Fitts (vitesse, type et référentiel du mouvement)**

Pour comprendre les mécanismes du mouvement lors de l'interaction entre le manche et le pilote, il faut tenir compte des propriétés de l'ensemble du système Homme-Machine.

Dans ce cas, la compréhension de l'influence du mode de contrôle et du référentiel de la tâche semble pertinent. Le contrôle manuel d'un aéronef est réalisé par une commande (type joystick) qui peut être régi par différents modes de contrôle : mode de contrôle en position ou un mode de contrôle en vitesse. Le mode de contrôle en position consiste à avoir pour une position constante du manche, une position constante du mobile. Le mode de contrôle en vitesse évoque que pour un déplacement du manche (i.e. une position), il y a une vitesse constante associée à une position du mobile. La position évolue linéairement à la vitesse dans ce mode. Le temps nécessaire pour réaliser une tâche par le mouvement du contrôleur (i.e. manche) est généralement utilisé pour comparer les performances des différentes conditions de contrôle. Jagacinski et collègues (1978) ont étudié la capacité à effectuer des mouvements discrets, lorsque le système de contrôle manipulait la position ou la vitesse d'un curseur dans une tâche de Fitts 2D en géocentré. Les résultats ont suggéré que ces deux modes de contrôle étaient linéairement proportionnels à l'ID et que la pente du TM en fonction de l'ID était deux fois plus importante pour un contrôle en vitesse que pour un système de contrôle en position. Jagacinski et collègues (1978) ont étudié ces différents modes de contrôle dans un cadre de référence géocentré. Le contrôle d'objet dans le cadre d'une navigation peut se réaliser à la fois dans un système de référence égocentrique. Il s'agit donc de caractériser la robustesse de ces modèles dans différents cadres de référence (géocentré et égocentré), pour la navigation aérienne sous différents modes de contrôle. Plusieurs études ont évalué l'utilité de la représentation spatiale d'un environnement selon ces différents cadres de référence. Il s'avère qu'une interface égocentrique améliore nettement le contrôle et les performances de navigation des pilotes (Wickens et Prevett, 1995 ; Cho et al, 2017 ; Lin et al, 2017). Les études sur les différentes techniques de navigation montrent que le référentiel égocentré permet une diminution de l'amplitude du mouvement et du temps d'exécution de la tâche ainsi qu'une augmentation significative des performances de la mémoire spatiale à long terme

(McNamara et al, 2003 ; Rädle et al, 2013). Il semble intéressant de comparer le niveau de performance des mouvements dans le contrôle d'un aéronef au travers de différents systèmes de référence suivant le mode de contrôle utilisé (position versus vitesse). Ces comparaisons permettraient d'observer leurs évolutions respectives et d'étudier si la relation entre la charge cognitive et l'ID suit la même loi selon le mode contrôle exercé dans le cadre de référence géocentré ou égocentré. Le paradigme de la loi Fitts est appliqué dans le cadre géocentré. La loi de pilotage (Steering law) permet de prédire le temps de déplacement dans un espace particulier avec des contraintes. Ces lois du contrôle moteur (loi de Fitts, Steering) et les théories citées plus haut, peuvent potentialiser l'étude des mécanismes du système sensorimoteur du pilote. Pour la conception d'une assistance haptique au pilotage nous devons nous placer dans le cadre de référence égocentré. Il semble donc primordial de tenir compte de ces aspects pour apporter une aide pertinente dans le cockpit.

## 5. Les différentes approches de la loi de Fitts (dynamique et optimale)

Pour caractériser l'optimalité du mouvement humain (i.e. l'harmonicité de la trajectoire) et comprendre les mécanismes qui en découlent, Mottet & Bootsma (1999) ont réalisé une version réciproque de la tâche de Fitts (i.e. tâche de pointages réciproques entre deux cibles). Voulant caractériser l'optimalité du mouvement humain (i.e., l'harmonicité de la trajectoire), ils ont cherché à comprendre les mécanismes de contrôle de nos mouvements. Ils ont montré que l'organisation cinématique du mouvement diffère selon le niveau de difficulté (i.e., l'ID). Pour des ID faibles, on observe une stratégie de contrôle évoluant vers un modèle contenant une fonction d'amortissement de Van der Pol et une fonction linéaire de Duffing synonyme d'expertise du geste. Autrement dit, le mouvement est moins couteux du point de vue du contrôle et il est caractéristique d'une forme sinusoidale. Inversement, pour des ID élevés, ils ont constaté une modulation de fonctions des termes non-linéaires de Duffing et d'amortissement de Rayleigh associées à des mouvements plus couteux. Avec l'augmentation de l'ID de la tâche, cette formalisation permet la caractérisation d'un état stable auto-entretenu du mouvement sous forme d'un portrait de phase<sup>6</sup> dont le changement de topologie décrit l'évolution d'un attracteur de type cycle limite vers un attracteur de type point fixe. Pour un ID faible, le portrait de phase est caractérisé par une symétrie du mouvement de pointage réciproque entre les deux cibles, avec un pic de vitesse centré sur chaque demi phase, synonyme de fluidité de mouvement. En revanche, pour des ID élevés, ils ont constaté un décalage du pic de vitesse qui arrive plus tôt dans la demi phase (Mottet & Bootsma, 1999 ; Fernandez & Bootsma, 2008) et donnant lieu à une phase de décélération plus longue que la phase d'accélération. Cette bifurcation de patron cinématique en fonction de l'ID suppose que le système neuromusculosquelettique oscille entre deux modes de contrôle pour s'adapter aux exigences spatio-temporelles de la tâche de pointage (Huys & al, 2010). Le contrôle de l'action est

---

<sup>6</sup> Le portrait de phase représente la vitesse en fonction de la position sur un cercle normalisé [-1 ; 1], c'est l'un des critères utilisés dans Mottet et Bootsma 1999 pour montrer l'évolution de l'organisation du pattern cinématique du mouvement en fonction des contraintes de la tâche.

défini par un changement de dynamique en fonction de la difficulté de la tâche, représenté par un modèle dynamique ayant des caractéristiques propres.

Dans ce cadre conceptuel, [Loeches De La Fuente et al \(2014a et 2014b\)](#) ont fait le lien entre l'adaptation de l'organisation au niveau cinématique et au niveau musculaire en fonction des contraintes de précision d'une tâche de slalom et ont validé l'intérêt de ces critères de caractérisation de l'optimalité du contrôle de l'action.

Ces deux paradigmes robustes ont été mis en lien avec des théories notamment dynamiques afin de comprendre l'optimisation du mouvement à la fois vis-à-vis des modes de contrôles de l'action et des critères d'optimalité. La loi de Fitts fait le lien entre la quantité d'information traitée lors du mouvement et la performance liée celui-ci. La relation entre ces deux termes est linéaire. Plus la difficulté de la tâche à réaliser est importante plus le temps pour l'exécuter sera important. Dans ce cadre, Fitts interprète la performance comme étant la résultante d'une unique variable qui ne dissocie pas le coût informationnel de la charge cognitive /effectif. Il semble important de dissocier la performance et l'optimalité. La performance est décrite comme une valeur mesurable de succès de réussite de la tâche, ici le temps de mouvement (i.e. % de réussite de la tâche). L'optimalité est associée à un critère qui permet la performance (i.e. fonction de coût).

Lors d'une tâche comment faire le lien entre la performance liée à la tâche et son optimalité ? Autrement dit, comment peut-on faire le lien entre un ID (en bit) et une fonction de coût (en u.a) pour analyser un mouvement et ses mécanismes ?

Pour pouvoir comparer ces deux valeurs, l'entropie semble être une voie intéressante. Shannon définit l'entropie comme étant le degré d'incertitude de l'information à traiter i.e. de la quantité d'information dont le récepteur a besoin pour déterminer le message sans ambiguïté. Elle contient une part d'incertitude du système et permet de déduire la variabilité de celui-ci. L'entropie permet d'avoir une mesure quantitative du contenu de l'information, de l'incertitude et de l'aléas de la source. D'après les travaux de [Soukoreff et collègues \(2011\)](#), la loi de Fitts et l'entropie donnent différentes quantités d'informations pour une même tâche. L'ID semble sous évaluer les informations transmises par le mouvement. Ils soutiennent que ces deux valeurs peuvent être analogues si les erreurs sont prises en compte de façon identique. Dans ce cas, il semble pertinent d'essayer d'exprimer les fonctions de coût et les ID en termes d'entropie pour comparer leur évolution et de déterminer quelle relation il existe entre ces deux valeurs associées à un mouvement (monotone, linéaire...). Les travaux de [Jirsa et collègues \(2000\)](#) montrent la non linéarité de la loi de Fitts. Ils étudient la non linéarité au travers de critères d'optimalité. Nous ne connaissons ni l'équivalence entre une fonction de coût et la performance associée, ni la relation entre ces deux en fonction de la difficulté de la tâche à réaliser.

## 6. Conclusion Partie 2

Cette partie nous a permis de parcourir différentes théories du contrôle moteur ainsi que les mécanismes associés. Nous avons détaillé particulièrement la loi de Fitts qui sera un outil principal pour étudier la relation entre la charge cognitive et le mouvement volontaire. Nous avons mis en lumière les liens entre le traitement de l'information et la réalisation d'une action.

La loi de Fitts comme elle est décrite va permettre de manipuler la quantité d'information que la personne doit traiter au travers de la difficulté de la tâche. Autrement dit, l'indice de difficulté va représenter de façon directe le niveau d'exigence informationnelle de la tâche à réaliser. Ce niveau d'exigence informationnelle va augmenter avec l'augmentation de la difficulté de la tâche et par conséquent la quantité de ressource pour traiter l'information va également augmenter. L'indice de difficulté sera dans ce cadre un bon indicateur de la charge cognitive associée à la tâche. Cette manipulation de l'indice de difficulté va nous servir de référence pour tester la sensibilité de nos différentes métriques aux différentes difficultés de tâche. La sensibilité de nos métriques à la difficulté de la tâche nous permettra de valider le statut de « mesure de la charge cognitive ».

Nous avons décrit la littérature concernant la charge cognitive et le contrôle moteur associé à la charge cognitive. Maintenant, nous allons détailler nos différentes expériences qui ont visé à déterminer la nature des relations entre les mesures de charge de travail et les métriques de coordination motrices au travers de différentes conditions jusqu'à un test en condition écologique de vol d'hélicoptère.

## METHODOLOGIE GENERALE

Cette partie présente l'ensemble du matériel, des procédures, des facteurs et métriques et les analyses associées aux expérimentations des chapitres 1 à 3. Un rappel succinct du protocole sera ensuite effectué individuellement dans les chapitres de chaque étude. La méthodologie concernant les essais en vol est spécifiquement présentée dans le Chapitre 4 dédié à cette étude.

### 1. Participants

46 participants droitiers ont participé aux expériences, il y avait 11 femmes et 35 hommes (dont 21 pilotes) avec une moyenne d'âge de 30.72 ans (sd : 6.89 ans). Un participant a dû être retiré suite à des anomalies dans l'acquisition des données (P10 dans le groupe vitesse). Pour les deux sessions en « Position », 22 participants (dont 11 pilotes et 11 civils comprenant 5 femmes et 17 hommes) ont participé avec une moyenne d'âge de 29.72 ans (sd : 4.80). Pour les deux sessions en « Vitesse », 21 participants (dont 10 pilotes et 11 civils comprenant 5 femmes et 16 hommes) ont participé avec une moyenne d'âge de 31.28 ans (sd : 5.97).

Les critères d'exclusion étaient les suivants : problèmes visuels, problèmes neuromusculaires et pathologies ayant un effet direct/indirect sur l'action sensori-motrice. Suivant la déclaration d'Helsinki, toutes les procédures ont été réalisées après la signature d'une note de consentement par chaque participant. Les données acquises étaient pseudo-anonymes. Le protocole a été validé par le comité éthique associé à Sorbonne Université.

### 2. La tâche

Une tâche de pointage réciproque entre deux cibles a été proposée. L'objectif a été de pointer alternativement les deux cibles le plus vite et précisément possible. La tâche de pointage a été réalisée par le participant le plus rapidement et précisément possible (selon le principe d'un conflit vitesse/précision). La tâche a été effectuée dans deux référentiels (voir Figure 3).

Le pointage a été effectué par le biais d'un curseur dont le déplacement à l'écran a été asservi au mouvement d'un contrôleur en configuration mini-manche. À la fin de chaque essai, un bloc sur deux, une mesure subjective de la charge de travail a été effectuée en utilisant l'échelle multicritère NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988). Cette tâche a été la même pour les quatre expériences réalisées durant cette thèse.

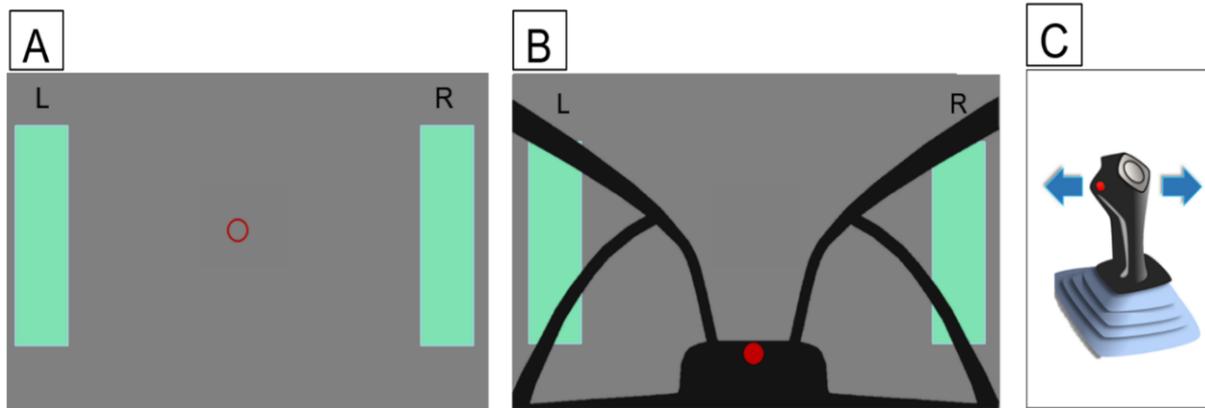


Figure 3 : (A) Schéma de la tâche expérimentale en référentiel géocentré et (B) en référentiel égocentré avec les annotations 'L' pour left et 'R' pour right sur les cibles représentées par les rectangles verts respectivement à gauche et droite. (C) montre le contrôleur avec des flèches bleues pour la direction du mouvement.

### 3. Protocole

#### 3.1. Le référentiel de la tâche

La notion de référentiel a permis de définir les valeurs d'une variable par rapport à un système de référence. Dans notre cas, le référentiel géocentré a été utilisé i.e. qu'il se base sur la verticale gravitaire avec pour origine le centre de la Terre. Le référentiel égocentré, lui, est centré sur l'individu lui-même comme système de référence.

Ces deux référentiels ont été choisis car le référentiel géocentré est celui classiquement utilisé dans la loi de Fitts et le référentiel égocentré se rapproche de celui d'une tâche de pilotage (voir Figure 3).

#### 3.2. Le mode de contrôle appliqué au contrôleur

Le mode de contrôle du manche a été manipulé pour faire la tâche. Deux groupes ont participé à l'expérience :

- Le premier groupe nommé « Groupe Position » a réalisé la tâche avec un mode de contrôle en position appliqué au manche pour les deux sessions. Ce mode signifie qu'une position du manche correspond à une position du curseur dans l'espace virtuel de simulation. En d'autres termes, la position du curseur a été contrôlée par les participants de sorte à obtenir un changement de position du manche avec un gain de 1.
- Le second groupe nommé « Groupe Vitesse » a réalisé la tâche avec un mode de contrôle en vitesse appliqué au manche pour les deux sessions. Ce mode signifie qu'une position du manche correspond à une vitesse du curseur dans l'espace virtuel de simulation. Autrement dit, dans ce mode la position du curseur a été contrôlée par les participants de sorte à obtenir une vitesse de déplacement avec un gain de 2.5 en géocentré et un gain de 2.8 en égocentré. Des gains différents ont

été déterminés pour les deux référentiels afin d'avoir des difficultés suffisantes pour chaque condition.

### 3.3. La difficulté de la tâche

La difficulté de tâche a été manipulée en déterminant 5 indices de difficulté pour chaque référentiel uniquement en modulant la taille des cibles. Ils ont été calculés d'après l'équation de [Fitts \(1954\)](#). Les différentes tailles de cibles de la tâche réciproque de Fitts ont été définies dans la scène virtuelle. Pour le référentiel géocentré les cibles ont été espacées d'une distance de 700 mm entre le centre des deux cibles et pour le référentiel égocentré d'une distance de 800mm. Le pointeur dans les deux conditions fait 8mm de large pour 20mm de hauteur. La largeur des cibles varie en fonction du référentiel et de l'ID (voir Figure 4 et Tableau 4).

Cependant, la hauteur des cibles est identique et fixe à 500mm et les paramétrages sont identiques pour chaque mode de contrôle.

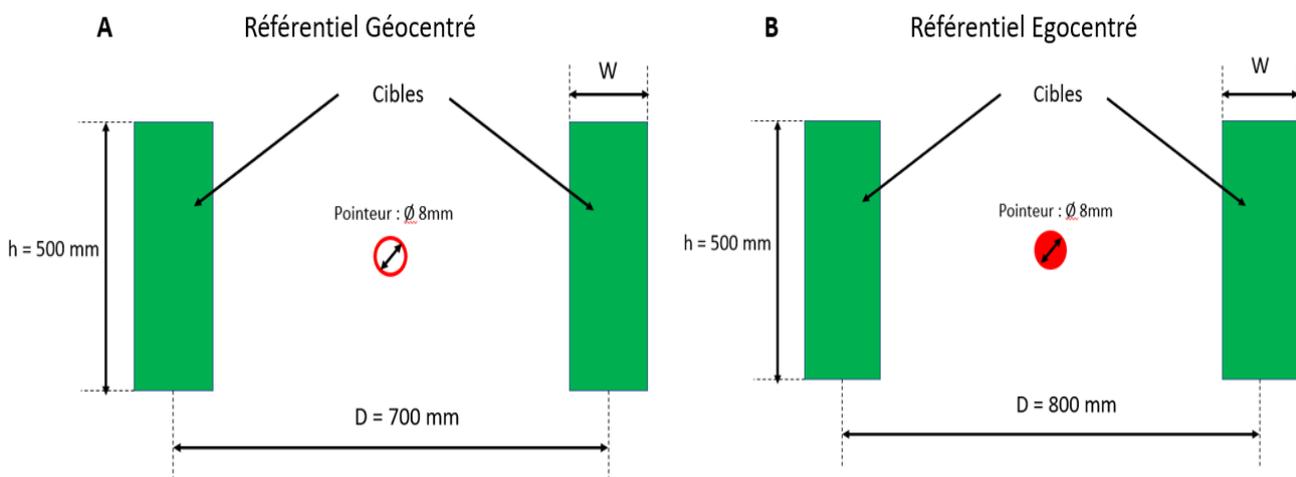


Figure 4 : Schéma du design de la tâche de Fitts pour le référentiel géocentré (A) et pour le référentiel égocentré (B).

### 3.4. Le niveau d'expertise

L'expertise de nos participants a été étudiée. Des personnes civiles et des personnes pilotes ont participé aux expériences (voir Tableau 3). Le niveau d'expertise a été déterminé à partir des nombres d'heures effectuées. Les participant ayant moins de 120 heures de vol ont été considérés « civil » et « pilotes » les participants ayant plus de 120 heures de vols.

Tableau 3 : Répartition des participants par catégories.

Groupe	Pilotes	Civils	TOTAL
Position	11	11	22
Vitesse	10	11	21 (+ 1 exclu)

3.5. Détail d'une session d'expérience

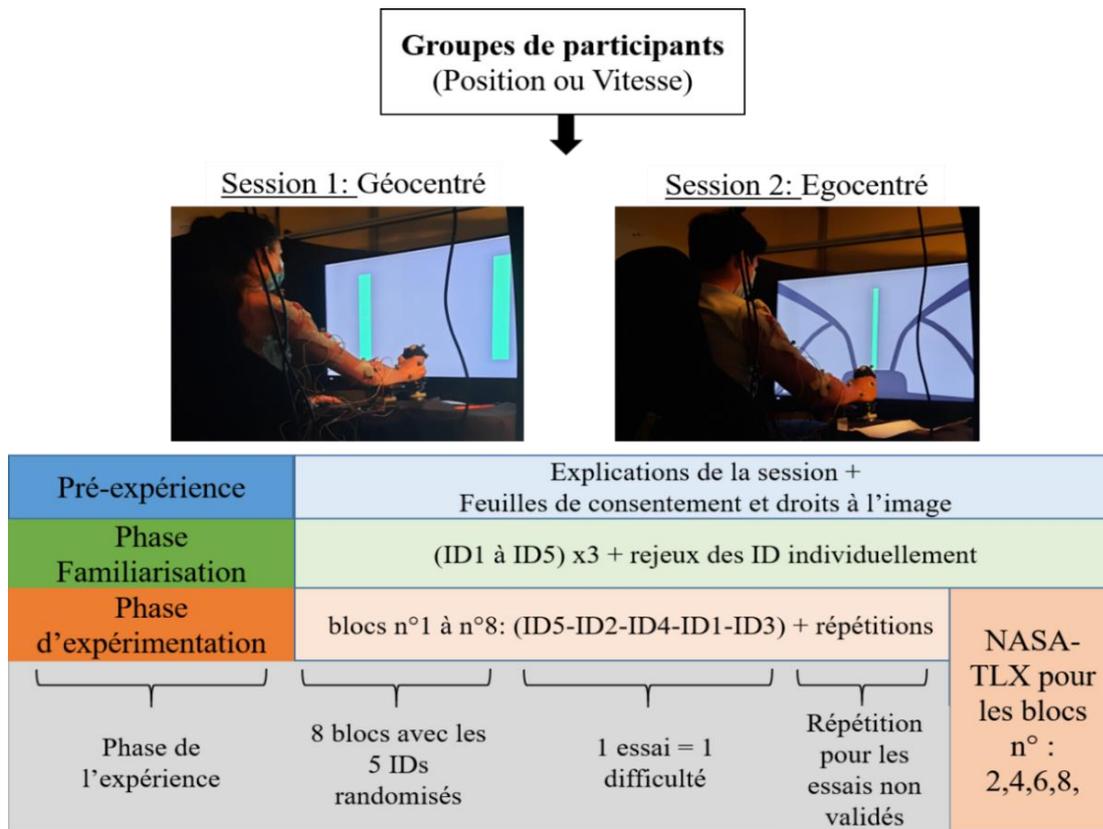


Figure 5 : Explications du setup expérimental des 4 expérimentations.

Tableau 4 : Paramétrage des expériences pour les deux référentiels.

Indice de difficulté (ID)	Référentiel Géocentré W (taille cible en mm)	Calcul ID (Bits/s)	Référentiel Egocentré W (taille cible en mm)	Calcul ID (Bits/s)
ID1	160	3.13	200	3
ID2	100	3.81	100	4
ID3	70	4.32	70	4.51
ID4	40	5.13	50	5.32
ID5	25	5.81	25	6

Chaque session d'expérimentation était composée de deux phases (voir Figure 5) :

- Une phase de familiarisation qui a permis aux participants de se familiariser avec la tâche et de comprendre le fonctionnement de l'expérience (le simulateur, le contrôleur et la tâche). Après 3 répétitions de chaque indice de difficulté (ID) ainsi que les éventuels rejeux (i.e. si performance non atteinte), la phase de familiarisation a été validée par le participant. Le nombre de trois répétitions a été

décidé afin de minimiser les effets d'apprentissage et dans le but de garder des temps de sessions inférieurs à 3heures.

- La phase d'expérimentation était la deuxième phase de la session. Cette phase a été composée de huit blocs des cinq essais randomisés. Chaque essai était caractérisé par un ID différent compris entre 1 et 5 (préalablement défini en suivant l'équation de [Fitts., 1954](#) et les recommandations de [Soukoureff et MacKenzie, 2004](#). L'ordre randomisé des ID a été prédéterminé et associé à chaque bloc. La randomisation des blocs était identique pour l'ensemble des participants. Lors de chaque essai, 32 cibles ont été atteintes, soit 16 cycles par essai. Un cycle est défini comme un aller-retour L-R-L ou R-L-R. Pour valider un essai, un pourcentage de réussite compris entre 75% et 95% (i.e., franchir entre 24 et 28 cibles sur 32) devait être réalisé par le participant. Ces pourcentages de réussite ont été choisis comme critère du conflit vitesse-précision. 100% de réussite pourrait vouloir dire que le participant a favorisé la précision à la vitesse et moins de 75% pourrait vouloir dire qu'il a favorisé la vitesse à la précision. Chaque essai échoué (trop d'overshoot ou d'undershoot) a été rejoué à la fin de la série. Pour les blocs n° 2, 4, 6 et 8 à la fin de chaque essai une mesure subjective de la charge de travail était effectuée grâce à l'échelle multicritères NASA-TLX ([Cegarra et Margado, 2009](#)). Après chaque bloc d'essais, les participants ont été informés par l'expérimentateur du nombre d'essais à rejouer.

Chaque groupe (Position ou Vitesse) a réalisé deux sessions distinctes d'expériences caractérisées par un référentiel : Géocentré puis Egocentré. Chaque session durait 2h30.

Pour chaque groupe, les variables indépendantes sont représentées par les 5 indices de difficulté (ID) ainsi que les deux référentiels (géocentré ou égo centré).

Les expériences 1 et 2 concernent le groupe en Position. L'expérience 1 est la session en condition géocentrée et l'expérience 2 est la session en condition égo centrée du groupe en Position.

Les expériences 3 et 4 concernent le groupe en Vitesse. L'expérience 3 est la session en condition géocentrée et l'expérience 4 est la session en condition égo centrée du groupe en Vitesse.

#### 4. Dispositifs et espace de simulation de la tâche



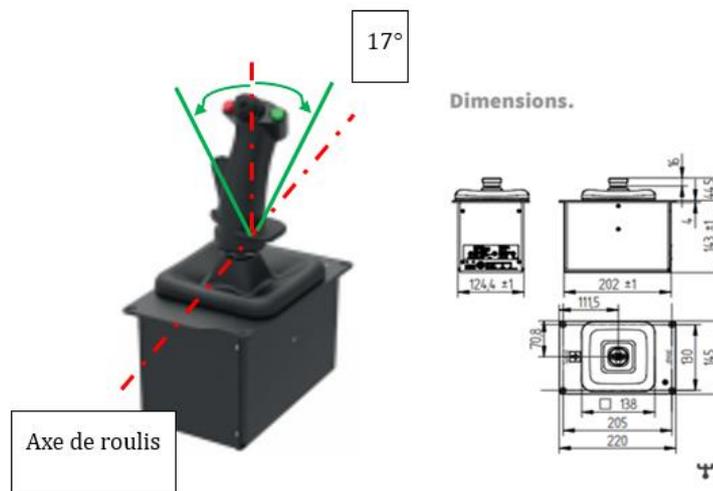
*Figure 6 : Photographie du setup de l'expérience.*

Pour cette expérience, la plateforme expérimentale SCHEMONO de l'ONERA a été utilisée avec un modèle véhicule d'aéronef type EC225, auquel a été intégrée : un mini manche Brunner® CLS-E Joystick (BRUNNER Elektronik AG), un dispositif EMG Biopac®150 Systems, Inc., avec comme logiciel d'acquisition Acqknowledge 4.1® (Software, Goleta CA 93117) ainsi qu'un système de capture du mouvement composé de 8 caméras FLEX 13 Optitrack™ NaturalPoint, Inc., avec le logiciel d'acquisition Motive 1.7.2® et 2.3 avec des marqueurs M4 12.7mm fixé sur base M4 tenu par du scotch à perruque double face (voir Figure 6).

L'environnement de la scène virtuelle a été réalisé via un logiciel de prototypage de scène virtuelle et il a été projeté sur un écran de 55 pouces en 16 :10. La distance focale et le champ de vision (FoV) ont été calculés de sorte à obtenir le meilleur visuel périphérique pour les participants. Le FoV était de 41° en vertical et de 61° en horizontal. La cinématique a été acquise à 100Hz par le simulateur. Parallèlement, les modèles de chaque objet dynamique du système (i.e. aéronef, mini-manche, visuel) ont été mis en relation par le logiciel Simulink® (voir annexe pour le détail des différents modèles).

#### 4.1. Le Système mini-manche actif Brunner®

Le mini-manche à retour d'effort Brunner® CLS-E Joystick est le contrôleur utilisé lors de ces expérimentations. Seule la dimension médio-latérale (i.e. l'axe de roulis) du mini-manche a été utilisée. Le débattement a été défini entre la position neutre à la droite ou gauche à  $17^\circ$ , soit un débattement total de  $34^\circ$ . L'axe antéro-postérieur a été bloqué (voir Figure 7). Aucune fonction haptique spécifique n'a été implémentée de sorte que les valeurs des paramètres dynamiques de raideur et d'amortissement soient nulles quelle que soit la position angulaire du contrôleur.



*Figure 7 : Mini-manche Brunner utilisé comme contrôleur dans l'expérimentation ainsi que ses dimensions.*

#### 4.2. Variables indépendantes et dépendantes

Différentes variables indépendantes ont été utilisées et plusieurs variables dépendantes ont été mesurées (voir Tableau 5). Les différentes variables indépendantes utilisées ont été détaillées au cours de 4 expériences de laboratoire.

Les variables indépendantes sont l'indice de difficulté (ID), le mode de contrôle utilisé (vitesse vs position) et le type référentiel appliqué (géocentré vs égo-centré). Les variables dépendantes traitées sont présentées dans le Tableau 3.

Toutes les mesures ont été faites en fonction du type de mouvement (pronation vs supination). Le mouvement de prono-supination est spécifique à l'avant-bras. La supination représente un mouvement de rotation avec une fin de mouvement la paume vers le ciel. La pronation représente un mouvement de rotation avec une fin de mouvement la paume vers le sol. Ce mouvement est largement utilisé lors du pilotage pour les mouvements latéraux du manche cyclique.

Dans le cadre de notre étude, les analyses des mesures ont été faites dans l'espace de la tâche et des mesures dans l'espace de l'effecteur. L'espace de la tâche est défini comme

l'espace virtuel où se déroule la tâche. L'espace effecteur est défini comme l'espace du bras du participant, et il fait l'objet de mesures cinématiques et électromyographiques.

*Tableau 5 : Présentation des variables indépendantes et dépendantes suivis de leur espace de traitement.*

Variables indépendantes (VI)		Variables dépendantes (VD)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mode de contrôle (position /vitesse)</li> <li>• Indices de difficultés (5IDs)</li> <li>• Condition (Géocentré/Egocentré)</li> <li>• Expertise (Pilote vs Civil)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métriques de performance (Nb-ok)</li> <li>• Métriques cinématiques (TMt, TMe, PVt, PVe)</li> <li>• Métriques EMG (index de co-activation, activation musculaire)</li> <li>• Métriques de charge cognitive (NASA-TLX, DIMSS-PM)</li> </ul>	
VD Espace de la tâche	VD Espace effecteur		VD autres
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de zones validées (Nb-ok)</li> <li>• Trajectoire de l'aéronef *</li> <li>• Temps de mouvement (TMt)</li> <li>• Position du pic de vitesse (PVt)</li> <li>• Portrait de phase</li> </ul>	<p><u>Cinématique espace effecteur :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Trajectoire du manche *</li> <li>• Temps de mouvement (TMe)</li> <li>• Position du pic de vitesse (PVe)</li> <li>• DIMSS-PM</li> </ul> <p><u>Electromyographiques :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau d'activation musculaire</li> </ul> <p><u>Fonctions de coût :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveau de co-activation musculaire</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Questionnaire NASA-TLX</li> </ul>

\* Dans le cas du mode de contrôle en position la trajectoire de l'aéronef est identique à celle du manche, car le gain est de 1 i.e. le déplacement de l'aéronef est identique à celui du mouvement effectué par le participant. Or, dans le cas du contrôle en vitesse la trajectoire de l'hélicoptère virtuelle ne représente pas les mouvements du bras puisque nous déplaçons une vitesse à l'écran.

Les données cinématiques obtenues à partir de l'activité au manche permettent le calcul de plans de phase, de portraits de Hooke, de profils de vitesse, du temps de mouvement (TMt, TMe), de la durée de la phase d'accélération (DA<sub>t</sub>, DA<sub>e</sub>) et de la position du pic de vitesse (PVt, PVe). Les mesures électromyographiques permettent d'étudier l'activité musculaire de chaque muscle et l'activité des couples musculaires d'intérêt choisis.

L'activité électromyographique du bras est enregistrée de manière synchrone avec l'environnement de simulation à 2000 Hz avec un gain de 500 sur 6 muscles à l'aide d'un Biopac® 150 et d'électrodes (Vinyl 1-3/8" Electrodes, stress gel ; Biopac® Systems, Inc. Goleta, CA 93117).

Les couples musculaires d'intérêts ont été choisis parmi les muscles de la chaîne du bras allant de l'épaule jusqu'à la main (Muscle supinateur/Muscle pronateur) :

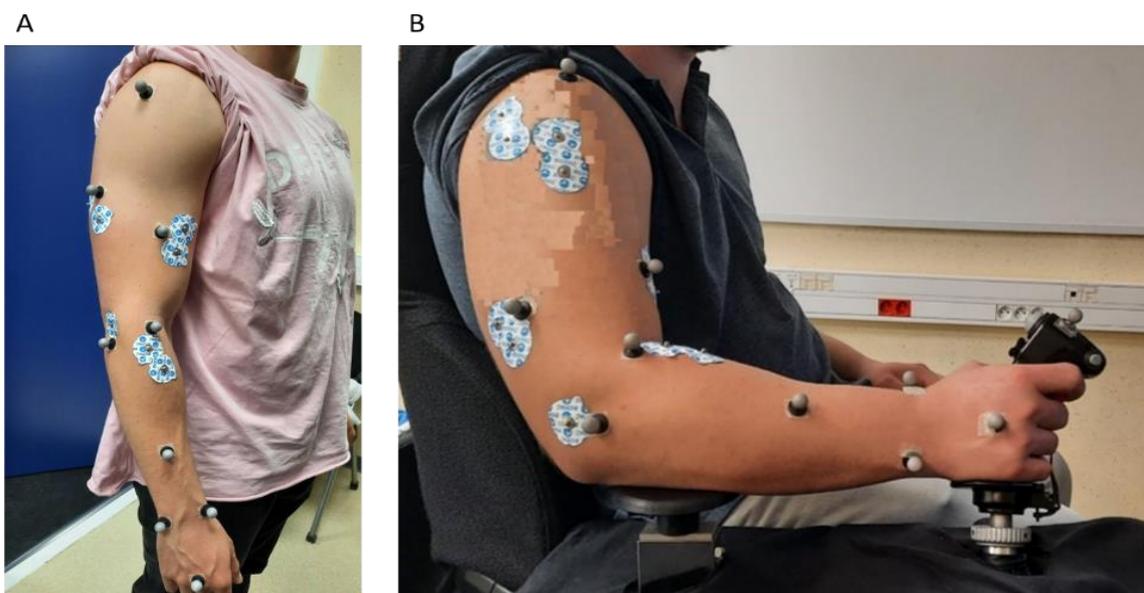
- Le deltoïde médian et le deltoïde postérieur pour les mouvements de l'articulation de l'épaule ;
- Le chef long du biceps brachial et le triceps brachial pour les mouvements de l'articulation du coude ;
- Le muscle brachioradial et le rond pronateur pour les mouvements du poignet.

Le choix de ces 3 couples musculaires a été fait dans le but de pouvoir étudier l'ensemble des mouvements autour des articulations du coude et du poignet. L'articulation de l'épaule étant plus complexe, nous avons préféré étudier que les deux autres articulations. Durant ces travaux, les caractéristiques des muscles n'ont pas été prises en compte.

Chaque électrode a été placée selon les recommandations de la SENIAM [seniam.org]. La peau de chaque sujet a été nettoyée et rasée à l'endroit où chaque électrode a été positionnée. L'électrode de référence a été fixée sur l'épicondyle latéral. L'emplacement des électrodes est présenté dans la Figure 5. Un trigger de début d'essai a été envoyé sur l'enregistrement EMG à partir du début de l'essai (i.e. après les 10 secondes de positionnement du manche pour initier la tâche) ainsi qu'un trigger de fin lorsque la dernière porte a été franchie afin de synchroniser les enregistrements EMG avec le reste de la simulation.

La capture du mouvement a été enregistrée de manière synchrone avec l'environnement de simulation, à 120 Hz sur les segments suivants (d'après le schéma « Plug-in-Gait Marker Placement » voir Annexe PARTIE 3) : RSHO- RUPA, RELB-RWRA et RWRA-RWRB.

Le participant était assis avec les genoux fléchis à 90° (voir Figure 8). Les épaules et le poignet droits ont été placés en position neutre, le coude à une position de « confort » et l'avant-bras en position en pronation à 90° (Loeches de la Fuentes et al., 2013 et 2014). Le positionnement du contrôleur a été ajusté selon les caractéristiques anthropométriques de chaque participant.



*Figure 8 : (A) Photographies du placement des électrodes EMG et des marqueurs de motion capture, (B) Photographie du positionnement du bras du participant lors de l'expérience.*

A partir des données cinématiques et EMG qui sont enregistrées dans l'espace de l'effecteur, des calculs de fonctions de coûts ont été réalisés. Le niveau de co-activation musculaire a été calculé. Cette fonction de coût de type musculaire permet d'observer les stratégies et l'efficacité au niveau de l'effecteur (Kellis et al. 2003, Ervilha 2003). La co-activation représente une stratégie musculaire qui implique une activation simultanée des muscles agonistes et antagonistes lors du mouvement. L'augmentation de la co-activation semble induire une augmentation de la raideur articulaire ce qui favoriserait la précision du mouvement (Gribble 2002).

Les mesures de la charge de travail ont été soit obtenues grâce au questionnaire NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) qui est une mesure subjective, soit obtenues par le DIMSS-PM (Dynamic Interface Modeling and Simulation System Product Metric) basé sur l'analyse cinématique de l'activité du contrôleur.

Le questionnaire NASA-TLX a été réadapté en français par Cegarra et Margado en 2009 (voir Annexe 1). Cette mesure est composée de six dimensions indépendantes que les participants doivent évaluer sur des échelles numériques, sur la base de leur ressenti : l'exigence mentale, l'exigence physique, l'exigence temporelle, l'effort, la performance et la frustration. La charge de travail est mesurée en calculant la moyenne des scores obtenus pour chacun de ces six dimensions (voir Annexe PARTIE 2).

Le DIMSS-PM est une mesure de la charge de travail à partir de l'activité cinématique au manche. Cette métrique est calculée comme le produit du nombre d'inversions dans le signal de contrôle (i.e. changement de direction) et la déviation standard du signal sur une fenêtre glissante de trois secondes.

## 5. Analyse des données

Dans un premier temps, les analyses ont été réalisées sur l'ensemble des participants. Dans un second temps, les analyses ont été réalisées en tenant compte du facteur expertise :

- La catégorie « Pilote » a été caractérisée par les participants ayant plus de 120 heures de vol.
- La catégorie « Civil » a été définie par les participants ayant moins de 120 heures de vol.

De plus, l'ensemble des données a été traité respectivement pour chaque groupe (Position / Vitesse et pour chaque référentiel (Géocentré et Egocentré) (Tableau 3).

L'ensemble des données cinématiques et électromyographiques a été traité par le biais d'un script Python et toutes les variables ont été analysées par demi-cycle.

## 5.1. Cinématique

Le traitement des données a été fait à l'échelle du demi-cycle et les données ont été filtrées. Les deux premiers et les deux derniers cycles ont été supprimés afin d'analyser uniquement les mouvements « stables » durant lequel s'effectue la tâche. 28 demi-cycles ont été traités par essai, soit 14 mouvements de supination et 14 mouvements de pronation (voir Tableau 6).

*Tableau 6 : Tableau des variables dépendantes mesurées en cinématique.*

Espace de la tâche	Espace effecteur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nombre de cibles validées</li> <li>• Temps de mouvement (TMt)</li> <li>• Position du pic de vitesse (PVt)</li> <li>• Portrait de phase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DIMSS-PM</li> <li>• Temps de mouvement (TMe)</li> <li>• Position de pic de vitesse (PVe)</li> </ul>

Le signal cinématique initial a été analysé pour ne conserver que les essais où le pourcentage de portes franchies (i.e. le pourcentage de réussite) est compris entre 75 et 95% pour chacun des essais. Le signal a été lissé par une convolution avec une fenêtre de Hamming de taille 11. Il est ensuite décomposé par type de mouvement supination ou pronation.

Les variables de cinématiques ont été calculées dans les deux espaces :

- L'espace de la tâche (i.e. le déplacement du curseur dans la scène virtuelle),
- L'espace de l'effecteur (i.e. le déplacement du manche correspondant au déplacement du bras).

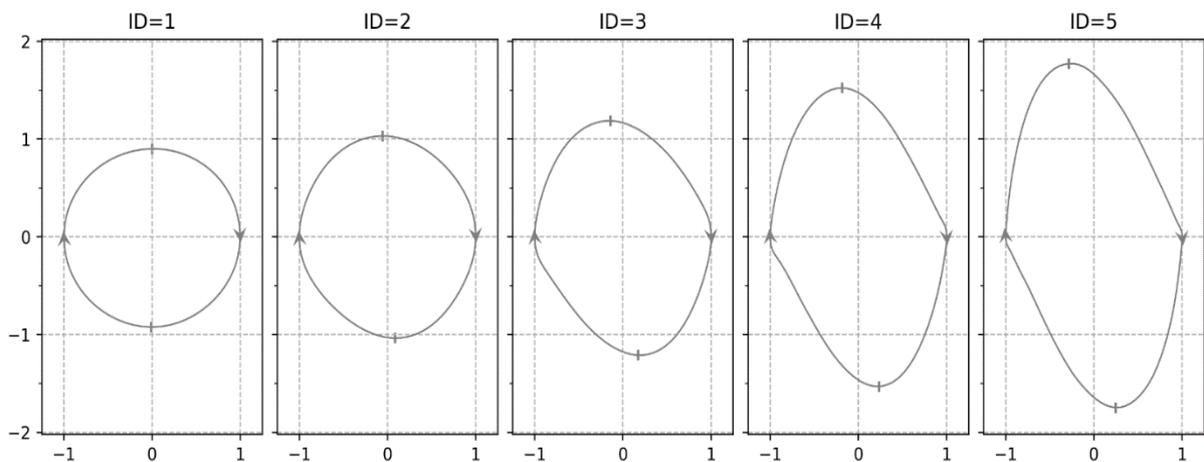
Pour rappel, dans les expériences en mode de contrôle en position les déplacements du curseur et du manche sont identiques, i.e. donc les mesures cinématiques faites dans les deux espaces sont les mêmes (i.e.  $TMt = TMe$  et  $PVt = PVe$ ). Autrement dit, le déplacement du curseur est représentatif des déplacements du bras sur la manche. Pour toutes les expériences en contrôle en position, un seul TM et PV ont été calculés sur la base du déplacement du manche.

Dans les expériences en mode de contrôle en vitesse, les déplacements du curseur et du manche ne sont pas identiques, i.e. les déplacements dans l'espace effecteur sont caractéristiques du mouvement du bras tandis que les déplacements dans l'espace de la tâche sont représentatifs des mouvements du curseur avec le gain en vitesse associé (i.e.  $TMt \neq TMe$  et  $PVt \neq PVe$ ). Pour les expériences 3 et 4 en contrôle en vitesse, le temps de mouvement et la position du pic de vitesse ont été distingués pour chacun des deux espaces.

Les variables suivantes sont calculées pour chacun des demi-cycles puis moyennées soit par type de mouvement (supination/pronation) soit sur l'ensemble des demi-cycles, d'un participant (sur les 8 blocs) ou de l'ensemble des participants :

- Portrait de phase (position vs vitesse) : il correspond au tracé de la dérivée première du signal (i.e. la vitesse) en fonction de la position (voir Figure 9).

En suivant la méthodologie utilisée par [Mottet & Bootsma \(1999\)](#) qui analyse les données cinématiques dans un contexte d'oscillateur mécanique, le vecteur position est remis à l'échelle sur  $[-1, 1]$  ; la vitesse est quant à elle multipliée par le facteur  $1/(A\omega)$ , où  $A$  correspond à l'élongation maximale du cycle et  $\omega$  est la pulsation. Cette représentation permet de visualiser le niveau de non linéarité du processus oscillatoire : du cercle pour un oscillateur harmonique (vérifier qu'il est bien purement linéaire) à une ellipse pour un oscillateur non-linéaire. Cet état stable en cycle limite (i.e. cercle) est caractérisé par une symétrie entre les deux demi phases du mouvement réciproque, avec un pic de vitesse se situant au centre du mouvement, synonyme de stabilité et fluidité du mouvement. Pour le profil en point fixe (i.e. ellipse), ils ont constaté un décalage du pic de vitesse plus tôt durant la phase d'accélération et une décélération plus importante avec l'augmentation de l'ID, modifiant le pattern cinématique du mouvement.



*Figure 9* : Figure représentant l'évolution du plan de phase avec le basculement d'un oscillateur harmonique (cercle) vers un oscillateur non-linéaire (ellipse), normalisée entre 1 et -1 d'après la méthode de [Mottet et Bootsma 1999](#).

Afin d'expliciter les mesures suivantes voici un schéma explicatif des mesures cinématiques qui vont suivre (voir Figure 11) :

- Temps de Mouvement (TM) : Il représente la durée moyenne du déplacement de la cible entre deux portes (i.e. un demi-cycle).
- Position du pic de vitesse (PV) : Elle est calculée par demi-cycle comme la position où la vitesse de mouvement est maximale.
- Durée de la phase d'accélération (TA) : Elle est déterminée par la durée entre le début du demi-cycle et le pic de vitesse.

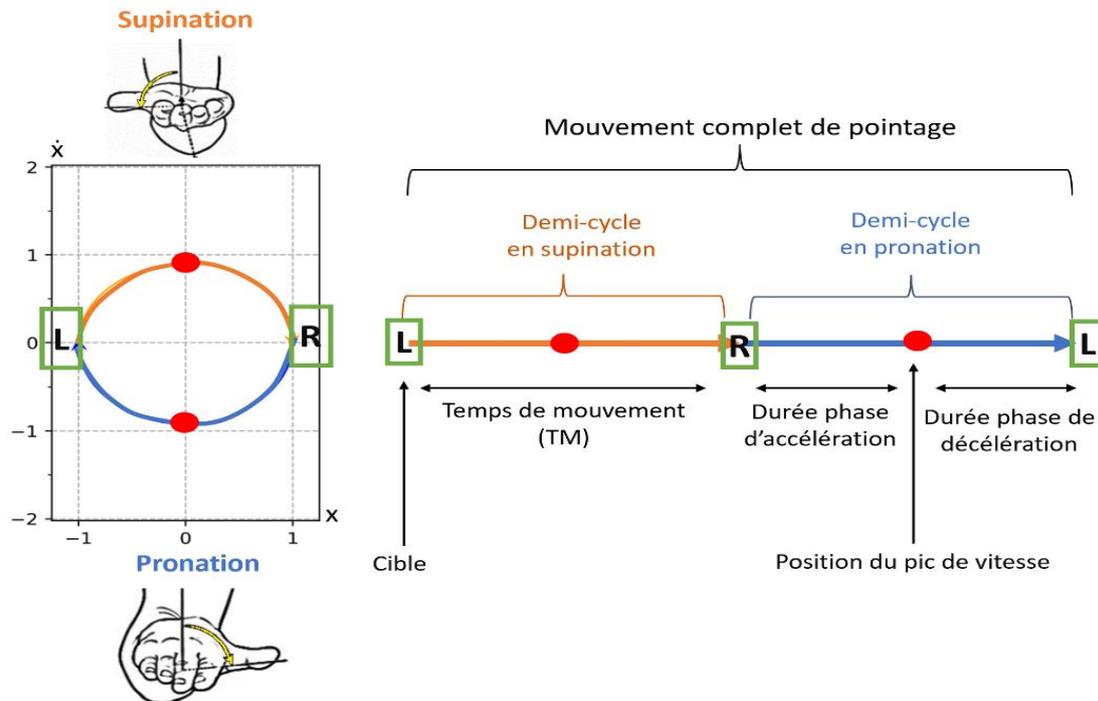


Figure 10 : Schéma représentant le découpage d'un cycle d'un pointage réciproque avec les mesures cinématiques de temps de mouvement, position du pic de vitesse, durée de la phase d'accélération et de décélération.

- DIMSS-PM (Dynamic Interface Modeling and Simulation System Product Metric).

A partir de l'activité cinématique au manche, le DIMSS-PM a été calculé. Cette mesure est utilisée dans le domaine aéronautique afin de caractériser la charge de travail du pilote à partir de l'activité au manche. Dans la littérature (Jennings, Craig et al. 2005), ils associent une charge élevée du pilote à des valeurs élevées du DIMSS-PM ce qui correspondent à des mouvements de contrôle à haute fréquence ou de grande amplitude. Inversement, une faible charge de travail est associée à de faibles valeurs du DIMSS-PM qui correspondent à des mouvements à basses fréquences et de faibles amplitudes (Corwin et al. 1989).

Le DIMSS PM est calculé comme le produit du nombre d'inversion dans le signal du contrôleur (i.e. changement de direction) et la déviation standard du signal sur une fenêtre glissante de trois secondes.

Lors de notre analyse, le DIMSS-PM a été calculé sur des fenêtres de 3 secondes et la valeur médiane obtenue sur chaque essai a été utilisée. Un échantillonnage régulier a été pris, puis une largeur de fenêtre de 3 secondes fixe pour l'ensemble des signaux a été choisie. La largeur de la fenêtre a été calculée en nombre de points (i.e. vecteur) en faisant 3 secondes par pas de temps. Le nombre d'inversions a été calculé par (i.e. le nombre de max et min locaux sur la durée de la fenêtre de 3 secondes) \* écart type du signal (sur la fenêtre de 3 secondes) (voir Figure11) :

$$DIMSS - PM = \text{nombre d'inversion}(s) * sd (s(t))$$

Le nombre d'inversion tout au long du signal a été calculé en déplaçant la fenêtre glissante de 3 secondes tous les pas de temps. Une valeur de DIMSS-PM a été obtenue à chaque pas de temps, ce qui permet d'avoir l'évolution de cette valeur. Cette valeur a été calculée par ID et moyennée pour les 8 blocs par participants.

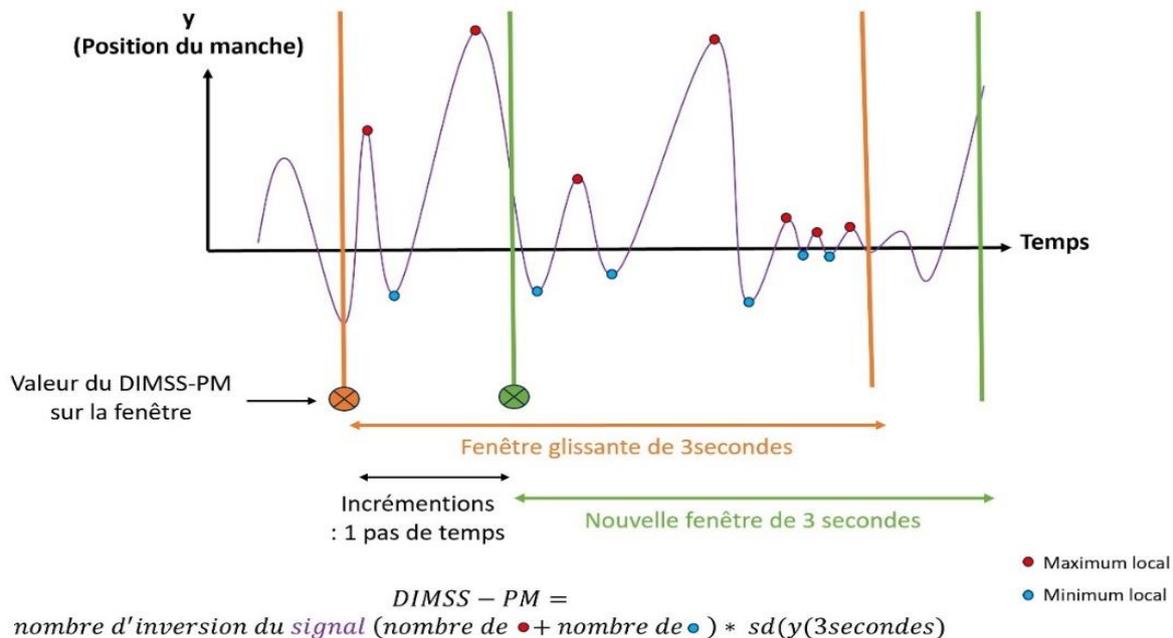


Figure 11 : Schéma du calcul du DIMSS-PM.

## 5.2. Electromyographie (EMG)

Les données EMG ont été enregistrées par bloc et ponctuées de triggers pour marquer les différents essais et permettre ainsi la synchronisation avec les acquisitions cinématiques.

Les signaux EMG ont été ensuite pré-traités selon la démarche suivante :

- 1- Un filtre de Butterworth passe bande d'ordre 6 (entre  $20 * 1.247$  et  $400 * 1.247$  Hz) a été appliqué afin de supprimer le bruit du signal.
- 2- A cela, un filtre de Butterworth coupe-bande d'ordre 6 (entre 49 et 50.5 Hz) a été appliqué afin de supprimer le bruit dû aux sources extérieures électromagnétiques.
- 3- Le signal a été redressé en valeur absolue puis un filtre de Butterworth passe bas d'ordre 6 (sous 50 Hz) a été appliqué afin d'éliminer les artefacts de mouvement situé entre 1 et 10Hz et l'instabilité du signal EMG entre 0 et 20 Hz.

Le signal a été normalisé par muscle en fonction de la contraction maximale enregistrée sur l'ensemble des essais d'une session. Un traitement supplémentaire a été réalisé pour retirer les portions d'EMG correspondant aux 2 premiers et 2 derniers cycles.

Les signaux ont été partitionnés en fonction du mouvement associé : supination ou pronation.

Enfin, une des limites de notre traitement est qu'aucun décalage n'a été ajouté afin de prendre en compte le délai électromécanique (compris entre 30 et 100ms) lors de la synchronisation avec les données cinématiques.

### 5.2.1. Co-activation musculaire

Il existe plusieurs types de mesures de la co-activation. Dans le cadre de cette thèse, les méthodes de Kellis ([Kellis, 2003](#)) et Ervilha ([Ervilha 2012](#)) ont été utilisées. Ces deux méthodes déterminent un pourcentage de co-activation à partir de l'activité des muscles agonistes et antagonistes durant le mouvement. Leur calcul permet d'obtenir un pourcentage de co-activation. Plus le pourcentage est important, plus la co-activation est importante. Lorsque nous avons utilisé ces deux méthodes, certaines limites ont été rencontrées notamment concernant l'influence de la vitesse. Le niveau de co-activation obtenu était principalement dû à l'augmentation de la vitesse du mouvement et non à l'augmentation de la quantité d'information à traiter (liée à l'augmentation de l'ID). Pour compléter ces deux mesures, une nouvelle mesure de la co-activation a été introduite : la différence des intégrales avant/après le pic de vitesse des muscles agonistes/antagonistes sur un demi cycle. Le but de cette nouvelle métrique est d'essayer de définir une mesure plus adaptée aux variations de vitesse du mouvement liée à la tâche de Fitts. Elle a été créée à partir de l'explication de la cinématique des mouvements, notamment autour du pic de vitesse qui semble être un élément critique du pattern cinématique.

#### 5.2.1.1. La méthode de Ervilha

A partir de ce pré-traitement du signal, le signal EMG a été analysé avec l'index de co-activation comme décrit dans [Ervilha \(2012\)](#) :

$$CI1 = 2 * \frac{EMG_{ANT}}{EMG_{ANT} + EMG_{AG}}$$

$EMG_{ANT}$  = activité musculaire du muscle antagoniste (i.e. le muscle qui a la plus grande activité entre les deux muscles du couple).

$EMG_{AG}$  = activité musculaire du muscle agoniste (i.e. le muscle qui a la plus petite activité entre les deux muscles du couple).

La méthode repose ici sur les valeurs moyennes de signaux des muscles agonistes et antagonistes. Plus la valeur du CI1 est grande plus la co-activation est importante.

#### 5.2.1.2. La méthode de Kellis

L'index de Kellis ([Kellis et al., 2003](#)) a été calculé, basé sur l'intégrale des signaux des agonistes et antagonistes.

$$C1 = \frac{2I_{ant}}{I_{total}} * 100$$

$$I_{ant} = \int_{t1}^{t2} EMGRF(t)dt + \int_{t2}^{t3} EMGBF(t)dt$$

$$I_{total} = \int_{t1}^{t3} [EMG_{ago} + EMG_{ant}](t)dt$$

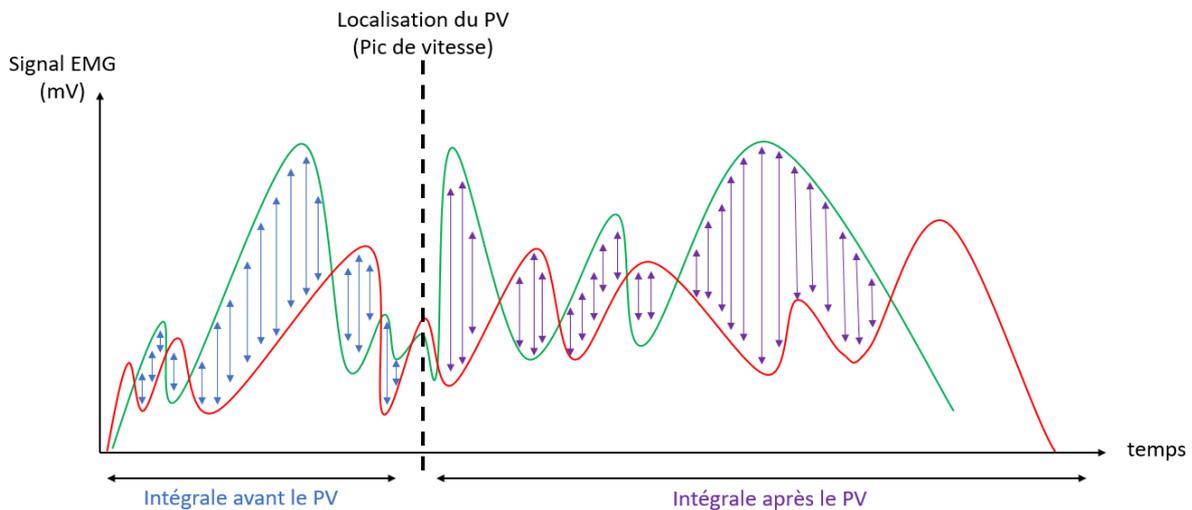
Cette méthode utilise l'intégrale de l'activité des muscles. Dans cette mesure, plus la valeur du coefficient C1 est grand plus la co-activation est grande.

### 5.2.1.3. La différence des intégrales de co-activation (agoniste-antagoniste) avant/après le pic de vitesse

La différence des intégrales avant/après le pic de vitesse de la co-activation agoniste/antagoniste sur un demi-cycle a été calculée. Cette mesure a permis d'apprécier la quantité de co-activation. L'utilisation de la valeur absolue (également présente dans les différentes mesures citées précédemment) revient à considérer comme agoniste et antagoniste respectivement le muscle qui a la plus grande amplitude de signal et la plus petite amplitude.

Le calcul a été effectué de la façon suivante (voir Figure 12) :

$$Diff\_integrale_{AVAP} = |int_{before} - int_{after}|$$



$$Diff\_integrale_{AVAP} = |int_{before} - int_{after}|$$

Figure 12 : Schéma du calcul de la différence des intégrales : Diff\_integrale AVAP.

Avec t = temps, t<sub>pic</sub> = temps au pic de vitesse sur le demi-cycle, ago = signal filtré de l'agoniste (i.e. le signal EMG dont l'amplitude est la plus grande des deux sur la période

T), antago = signal filtré de l'antagoniste (i.e. le signal EMG dont l'amplitude est la plus petite des deux sur la période T).

Pour notre mesure, plus la valeur est petite, plus la différence entre les deux signaux est faible ce qui correspond à une activité du même ordre de grandeur pour les muscles antagonistes et donc à une co-activation.

L'intégrale de la différence d'activité du couple agoniste/antagoniste avant le pic de vitesse a été calculée par le calcul suivant :

$$int_{beforePV} = \int_{t=0}^{t=tpic} \left| \frac{ago(t) - antago(t)}{tpic - 0} \right| dt$$

L'intégrale de la différence d'activité du couple agoniste/antagoniste après le pic de vitesse a été calculée par le calcul suivant :

$$int_{afterPV} = \int_{t=tpic}^{t=1} \left| \frac{ago(t) - antago(t)}{1 - tpic} \right| dt$$

Pour les calculs spécifiques des intégrales avant et après le pic de vitesse, la même interprétation a été faite i.e. plus la valeur est petite, plus la différence entre les deux signaux est faible ce qui correspond à la présence de co-activation.

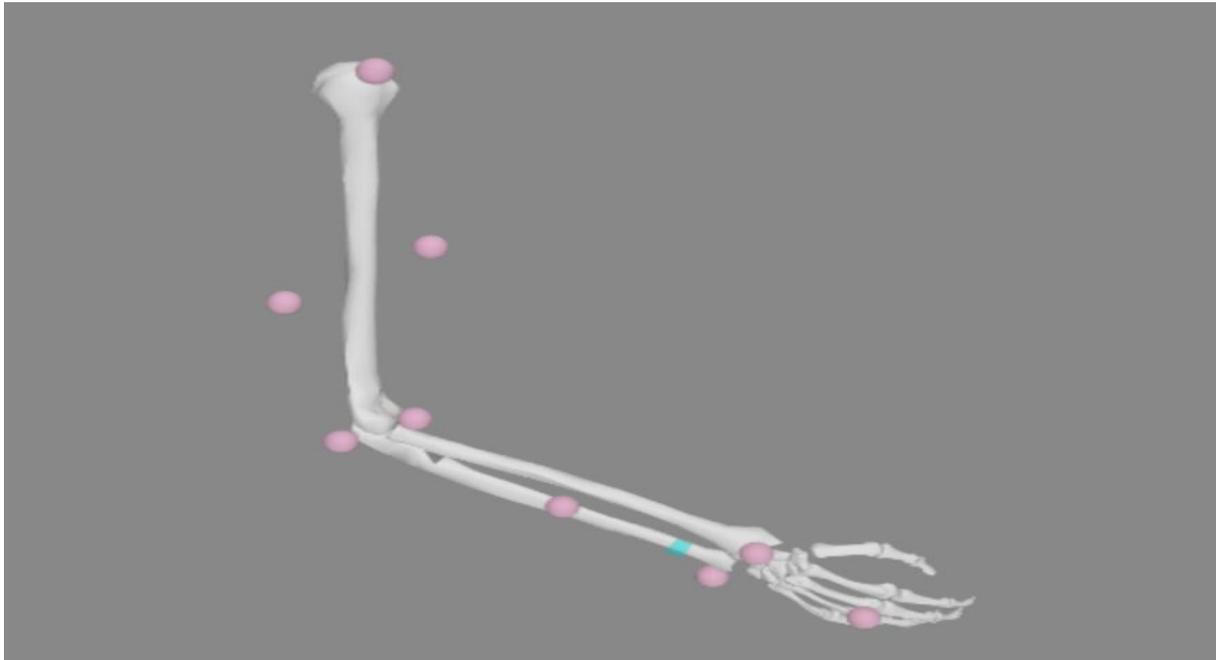
Le maximum, la moyenne et l'intégrale de l'activité EMG de chaque muscle par type de mouvement pour chaque ID ont été calculés. De plus, les intégrales de l'activité EMG de chaque muscle avant et après le pic de vitesse pour chaque ID ont été calculées.

### 5.3. Motion Capture

Pour les données de capture du mouvement, les bruits potentiels des fichiers (i.e. points lumineux autres que nos marqueurs dans le signal) ont été nettoyés et les marqueurs ont été labellisés. Les fichiers nettoyés et filtrés ont été découpés de la même façon que ceux de l'EMG. Des triggers de début et de fin de bloc ont été envoyés aux données puis les données ont été rééchantillonnées de sorte à pouvoir découper les portions de signal correspondant aux essais pour chaque participant.

Une fois l'obtention d'un fichier prétraité par essai (i.e. ID), une modélisation du mouvement dans OpenSim a été faite. Afin de modéliser chaque session pour chaque participant, un modèle simplifié du bras à partir d'un modèle OpenSim existant : Arm26 a été élaboré. Les segments d'intérêts, les degrés de liberté de chaque articulation, les contraintes externes/internes ont été déterminés afin que le logiciel puisse faire une modélisation simplifiée mais fidèle du mouvement. Un modèle adapté a été fait pour chaque participant à partir de ses données anthropométriques (poids, tailles, morphologie). A l'issue de la création du modèle adapté, une modélisation du mouvement a été faite pour chaque essai et des calculs de dynamique inverse ont été faits afin d'obtenir des valeurs des couples articulaires. Ces valeurs ont permis à la fois d'obtenir des indications sur le mouvement produit mais également des variables indispensables

au calcul des fonctions de coûts. Ces calculs de fonctions de coût ont été faits en se basant sur la littérature (voir Figure 13).



*Figure 13* : Image du modèle de notre étude musculosquelettique adapté du modèle Arm26 dans OpenSim.

#### 5.4. Questionnaire subjectif d'évaluation de la charge de travail

Le NASA-TLX considère 6 scores différents pour 6 dimensions distinctes :

- Exigence mentale
- Exigence physique
- Exigence temporelle
- Performance
- Effort
- Frustration

Les 3 premières dimensions sont dépendantes des contraintes imposées par la tâche au participant : les exigences physiques, mentales et temporelles ; les interactions du participant avec la tâche : performance, effort et frustration.

Le résultat du questionnaire NASA-TLX est classiquement traité comme une moyenne des 6 dimensions contenus dans le questionnaire NASA-TLX.

L'analyse du NASA TLX dépend de la pondération indiquée par le participant. Cette pondération permet de savoir le poids de chacune des 6 dimensions. La valeur du score a été obtenue par la multiplication du score avec la pondération associée. Cette

multiplication permet de donner plus de poids aux dimensions importantes pour l'individu lors du calcul de la moyenne globale. Une moyenne du score des 6 dimensions pondérés a été obtenue pour chaque questionnaire. La moyenne du score a été faite par ID sur les 4 blocs. C'est l'analyse classique du NASA-TLX qui sera nommé l'analyse du score « global ».

Or, le questionnaire NASA-TLX prend en compte des dimensions très différentes.

Dans le but de se rapprocher du coût cognitif de la tâche, la dimension qui est la plus appropriée à la charge cognitive a été analysée c'est-à-dire le critère « exigence mentale » qui a sera nommé score « mental ». Afin de s'assurer que le coût cognitif évalué est représentatif d'un coût cognitif et non d'un coût physique, le critère « exigence physique » a été isolé et il sera nommé score « physique ». Pour ces deux analyses spécifiques du NASA-TLX, la même méthode a été utilisée que pour le calcul du score « global » vue précédemment.

## 5.5. Statistiques

Pour l'ensemble des données cinématiques, électromyographiques, Score du NASA-TLX, des tests statistiques ont été effectués par le biais de scripts Rstudio 2022.02.1 (Build 461©2009-2022 RStudio PBC).

Pour l'ensemble des résultats ayant une relation avec l'ID, les données sont définies comme appariées pour 1 groupe de participants avec n conditions (les ID).

La normalité des données pour chaque métrique a été préalablement vérifiée par le biais d'un test de Shapiro-Wilk.

En présence de données « normales », des tests statistiques paramétriques ont été utilisés : Anova à mesures répétées à 1 facteur comprenant un sous test de Mauchly et une correction de sphéricité de Greenhouse-Geisser. Des t-test avec comparaisons par paires avec un ajustement de Bonferroni ont été faits.

A contrario, en présence de données « non-normales », des tests statistiques non-paramétriques ont été appliqués : le test de Friedman. Des tests de Wilcoxon avec comparaisons par paire avec un ajustement de Bonferroni ont été réalisés.

Pour les données d'expertise, les données des pilotes et des civils ont été comparées. Les données sont définies comme 2 groupes indépendants avec des données appariées. Un modèle linéaire mixte a été utilisé en utilisant le modèle tel qu'il est décrit par [Verbeke & Molenberghs \(2000\)](#). Notre modèle comprenait les effets fixes des deux variables (Categorie qui représente le niveau d'expertise et Indice de difficulté i.e. la difficulté de la tâche) et des effets aléatoires décrit par les pentes et intercept de chaque participant.

Pour caractériser les relations entre nos variables, des corrélations ont été faites. Des corrélations pour mesures répétées à l'aide du package « rmcrr » de Rstudio ([Bakdash JZ et Marusich LR, 2017](#)) ont été réalisées. Le calcul de la corrélation a permis de

déterminer la relation entre deux variables et de définir l'influence de l'une sur l'autre. Ce coefficient se situe entre -1 et 1 avec 0 qui correspond à une corrélation nulle et 1 ou -1 qui correspond à une corrélation totale ce qui permet de définir l'intensité de la relation. Le signe du coefficient permet de caractériser le sens de la relation.

Les traitements statistiques de nos données comportent certaines limites. Aucun traitement statistique n'a pu être effectué entre les deux modes de contrôle puisque les participants n'étaient pas les mêmes pour les deux conditions.

De même, aucune analyse statistique n'a pu être réalisée entre les deux référentiels au sein d'un même mode de contrôle car la quantité de bits/sec n'était pas la même entre les IDs mais également les procès n'étaient pas les mêmes (principalement par la notion de gain dans le design du contrôle en vitesse).

## DEMARCHE EXPERIMENTALE

### **CHAPITRE 1 : Etude des relations entre métriques de charge de travail et métriques de caractérisation des coordinations motrices dans un référentiel géocentré et égocentré.**

L'objectif de ce premier chapitre consiste à déterminer la nature des relations entre les mesures de charges de travail classiquement utilisées dans le champ de l'ergonomie (questionnaire NASA-TX et DIMSS-PM) et les métriques relatives aux coordinations motrices (i.e., performance, cinématiques et électromyographiques) proposées dans le cadre de cette thèse. Dans un premier temps, les relations ont été étudiées pour un mode de contrôle en position dans deux référentiels (géocentré et égocentré).

Pour les deux référentiels, nous avons (1) étudié l'effet de l'augmentation des contraintes de la tâche (i.e. ID) sur les mesures de performance, du mouvement (cinématique/EMG) et de charge de travail (questionnaire NASA-TLX et DIMSS-PM). Puis nous avons (2) analysé les relations entre les mesures de charge de travail et les métriques cinématiques, électromyographiques et de performance.

#### **1. Matériel et méthodes des expériences 1 et 2**

##### **1.1. Participants**

22 participant(e)s droitier(e)s ont été recruté(e)s pour cette expérience dont 11 pilotes et 11 civils avec un âge moyen de 29.72 ans (sd : 4.80 ans) comprenant 5 femmes et 17 hommes.

##### **1.2. Protocole des deux expériences**

Dans les deux premières expérimentations, le mode de contrôle en position a été utilisé. Les participants ont fait une tâche de pointage réciproque entre deux cibles comme décrit dans la partie méthodologie générale (voir Figure 3). Le curseur en position a été utilisé de sorte qu'à une position du manche correspond à une position du curseur dans l'espace virtuel de simulation (voir Figure 15 et pour plus de détails, se référer à la partie : Méthodologie générale).

Pour la première expérience, la tâche a été réalisée en condition géocentrée i.e. que le participant a contrôlé le curseur pour cibler les deux rectangles verts (Figure 14-A).

Dans la deuxième expérience, la tâche a été effectuée en condition égocentrée i.e. que le participant a contrôlé un curseur en forme de cockpit ce qui a permis de donner l'impression que le participant aller lui-même pointer les cibles en étant dans un cockpit (voir Figure 14-B).

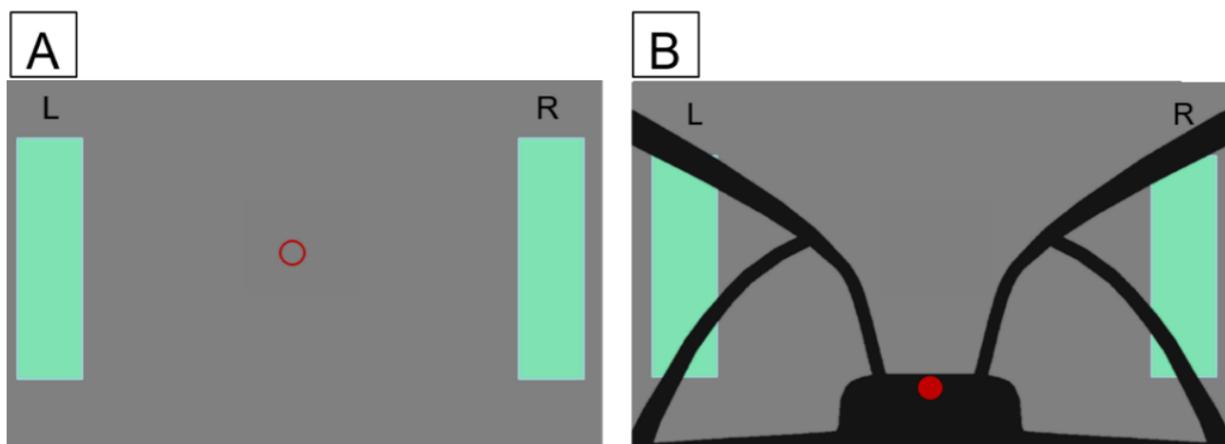


Figure 14 : (A) Représente le visuel de l'expérience en condition géocentrée et (B) le visuel de l'expérience en condition égocentrée.

### 1.3. Métriques et analyses

Dans ces deux expériences, la difficulté de la tâche (i.e. ID) a été manipulée avec 5 niveaux de difficulté (1 étant le plus facile et 5 le plus difficile).

Les variables dépendantes recueillies sont listées dans le Tableau 7 Toutes nos variables ont été traitées et analysées comme décrit dans la partie Méthodologie générale.

Tableau 7 : Tableau des variables dépendantes mesurées dans les expériences 1 et 2 et de leur espace de traitement

Catégorie de variables	Nom de la variable dépendante
Performance	Nombre de portes validées (Nb-ok)
Cinématique	Temps de mouvement (TM) Position du pic de vitesse (PV) DIMSS-PM Portrait de phase
Electromyographique	Activité musculaire par muscle Index de co-activation de Kellis Index de co-activation de Ervilha Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste
Questionnaire NASA-TLX	Score « global » Score « mental » Score « physique »
Espace de la tâche	Espace effecteur
Nombre de cibles validées (Nb-ok) Temps de mouvement (TM) Position du pic de vitesse (PV) Portrait de phase	DIMSS-PM Temps de mouvement (TM) Position du pic de vitesse (PV) Activité musculaire par muscle Index de co-activation de Kellis Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste

A noter que dans le mode de contrôle en position, le temps de mouvement (TM) et la position du pic de vitesse (PV) sont identiques dans l'espace de la tâche et dans l'espace effecteur. En effet, le mouvement du curseur analysé dans l'espace de la tâche représente le mouvement du bras effectué sur le manche analysé dans l'espace effecteur.

## 2. Hypothèses des expériences 1 et 2

Plusieurs hypothèses ont été élaborées et elles sont communes respectivement à chaque condition (géocentrée ou égocentrée) :

Notre première hypothèse postulait qu'une augmentation de l'ID s'accompagnait d'une augmentation de la charge cognitive visible à la fois sur les métriques de charge de travail ainsi que sur les métriques liées au mouvement. Plus précisément, nous avons pris les sous-hypothèses suivantes concernant l'impact de l'augmentation de l'ID sur nos métriques :

- (1) Augmentation des scores du NASA-TLX de façon spécifique au score mental.
- (2) Augmentation du DIMSS-PM.
- (3) Dégradation de la performance (tâche et cinématique).
- (4) Modification de la stratégie motrice (cinématique).
- (5) Augmentation de la co-activation (EMG).

Notre seconde hypothèse postulait qu'une relation monotone existe entre la mesure subjective de la charge cognitive et nos différentes métriques du mouvement avec l'augmentation de la difficulté de la tâche (ici du coût cognitif).

## 3. Résultats des expériences en position

### 3.1. Résultats sur la charge de travail : questionnaire NASA-TLX

Dans ces deux expériences, nous avons fait l'hypothèse que la charge cognitive telle que quantifiée par le questionnaire NASA TLX augmente avec le niveau de difficulté de la tâche.

Afin de tester cette hypothèse, l'évolution des scores obtenus sur le questionnaire NASA TLX en fonction du niveau d'ID a été explorée. Nous nous sommes intéressés au score « global » obtenu (moyenne des 6 dimensions du questionnaire) ainsi qu'au critère Exigence Mentale et Exigence Physique pris séparément.

Tout d'abord, un effet significatif de l'ID sur les trois types de scores a été observé (voir Figure 16) pour les deux référentiels.

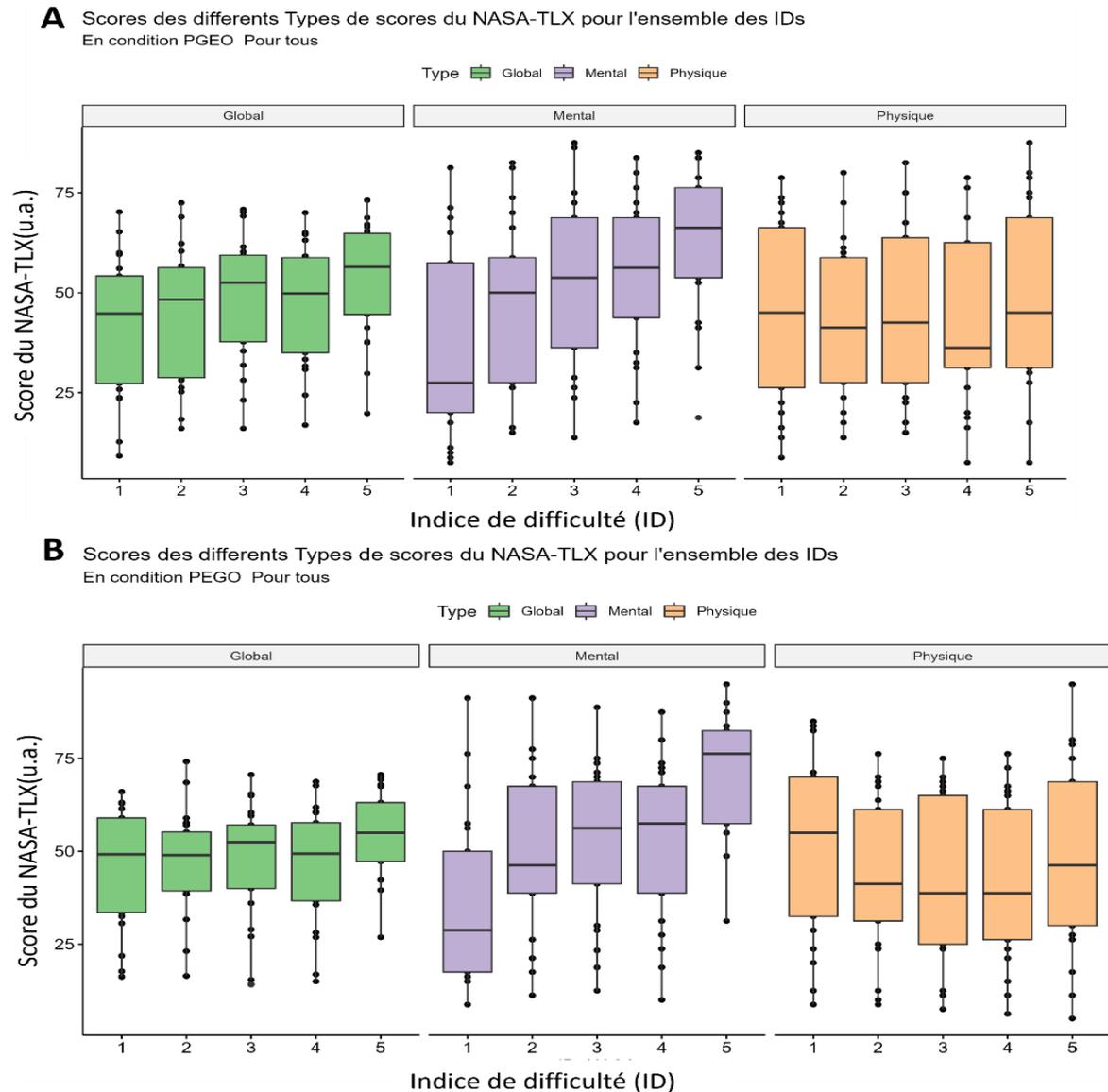


Figure 15 : Graphiques des résultats des scores du NASA-TLX en fonction de l'ID pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

Concernant le score « global » en condition géocentrée, une différence significative a été observée uniquement pour les paires ID1-ID2, ID2- ID3, ID2-ID4 et ID3-ID4 ( $F(4,80) = 14.801, p= 6.27^{-06}$  ; voir Figure 17\_A). En condition égocentrée, une différence significative a été trouvée pour les paires ID1-ID5, ID2-ID5, ID3-ID5, ID4-ID5 ( $F(4,80) = 10.394, p= 5.45^{-05}$  ;voir Figure 15).

Pour le score « mental », pour la condition géocentrée, nous avons des différences significatives pour l'ensemble des paires sauf pour la paire ID3-ID4 ( $X^2(4) = 62.3, p =9.300^{-13}$ ). Pour la condition égocentrée, nous avons des différences significatives toutes les paires sauf pour les paires ID2-ID3 et ID2-ID4 et ID3-ID4 ( $F(4,80)=41.071, p =3.32^{-11}$ ).

Pour le score « physique » en condition géocentrée, une différence significative a été observée uniquement pour les paires ID2-ID5 et ID4-ID5 ( $F(4,80) =4.07, p=0.025$ ). En

condition égocentrée, une différence significative a été constatée uniquement pour la paire ID4-ID5 ( $F(4,80) = 4.2650, p=0.03$ ).

Ces trois premiers résultats montrent pour les deux conditions (géocentrée et égocentrée) une plus grande sensibilité du score « mental » lors de l'augmentation de la difficulté de la tâche par rapport au score « global » et au score « physique ».

Nous avons également voulu étudier l'effet du type de score en fonction de l'ID.

Pour la condition géocentrée, aucun effet du type de score sur les ID1, ID2 et ID3 a été trouvé. Uniquement un effet du type de score a été observé pour les ID4 et ID5. En particulier, nous observons une différence significative pour la paire Global/Mental pour l'ID4 ( $F(2,40) = 5.217, p=0.026$ ) ainsi que pour les paires Global/Mental et Mental/Physique pour l'ID5 ( $F(2,40) = 8.685, p=0.005$ ).

Pour la condition égocentrée, un effet du type de score pour les ID1, ID3, ID4 et ID5 est à noter. Il n'y a pas de différence significative pour l'ID2 entre les différents types de scores. Un effet du type de score pour l'ID1 a été constaté mais aucune différence entre les paires a été trouvée ce qui dénote d'un faible effet principal ( $F(2,40) = 5.476, p=0.024$ ). En particulier, nous avons un effet significatif du type de score pour l'ID3 pour la paire Global/Mental ( $F(2,40) = 5.189, p=0.024$ ); l'ID4 pour les paires Global/Mental, et Mental/Physique ( $F(2,40) = 6.687, p=0.012$ ) et l'ID5 pour les paires Global/Mental et Mental/Physique ( $F(2,40) = 16.378, p=0.0002$ ).

Ces résultats montrent que les différences observées entre les différentes dimensions du questionnaire NASA TLX sont exacerbées pour des niveaux de difficulté élevés pour la condition géocentrée. Une nuance est à apporter en condition égocentrée, des différences plus fortes de scores pour les ID3 à ID5 entre les types de scores particulièrement entre les scores « global » et « mental » / « mental » et « physique ». Pour les deux conditions, les résultats viennent appuyer le fait que le score « mental » est plus influencé par la difficulté de la tâche que les deux autres types de scores.

En résumé, les résultats des deux référentiels semblent montrer une augmentation des scores du NASA-TLX avec l'augmentation de l'ID et cette influence est majoritairement observée sur le score « mental ». Nous observons donc une augmentation de la charge de travail avec l'augmentation de l'ID. De plus, le score « mental » semble le plus sensible à l'augmentation de la charge cognitive. Pour la condition géocentrée, le score « mental » présente des différences significativement fortes entre toutes les difficultés et avec des différences significatives avec les deux autres types de scores pour les deux plus grandes difficultés de tâches (ID4 et ID5). Cet effet de la difficulté semble diminuer lorsque l'on considère la dimension physique du questionnaire, ou bien lorsque l'on considère l'ensemble des dimensions simultanément (i.e., le score « global »). Tandis que pour la condition égocentrée, le score « mental » présente des différences significativement fortes entre l'ID1 et toutes les autres difficultés pour les trois plus grandes difficultés de tâches (ID3 à ID5). Cet effet de la difficulté semble s'atténuer lorsque l'on considère l'ensemble des dimensions simultanément (i.e. le score « global ») avec des différences entre l'ID5 et les autres difficultés. Lorsque l'on considère la dimension physique du questionnaire, cet effet de la difficulté semble ne pas exister. L'ensemble de ces résultats viennent appuyer le fait que la manipulation de l'indice de difficulté proposée ici pour les deux conditions

(géocentrée et égocentrée) impacte de manière plus importante la dimension cognitive de la charge de travail que les autres éléments liés à ce concept (notamment la dimension physique). La manipulation de l'ID en condition égocentrée impacte le score « global » principalement par rapport à la difficulté la plus élevée (ID5), ce qui indique que l'un des facteurs pris en compte dans ce score est sensible à l'ID5.

### 3.2. Résultats de la charge de travail : DIMSS-PM

Dans ces deux expériences, nous avons fait l'hypothèse que la charge cognitive telle que quantifiée par le DIMSS-PM augmente avec la difficulté de la tâche (voir Figure 16).

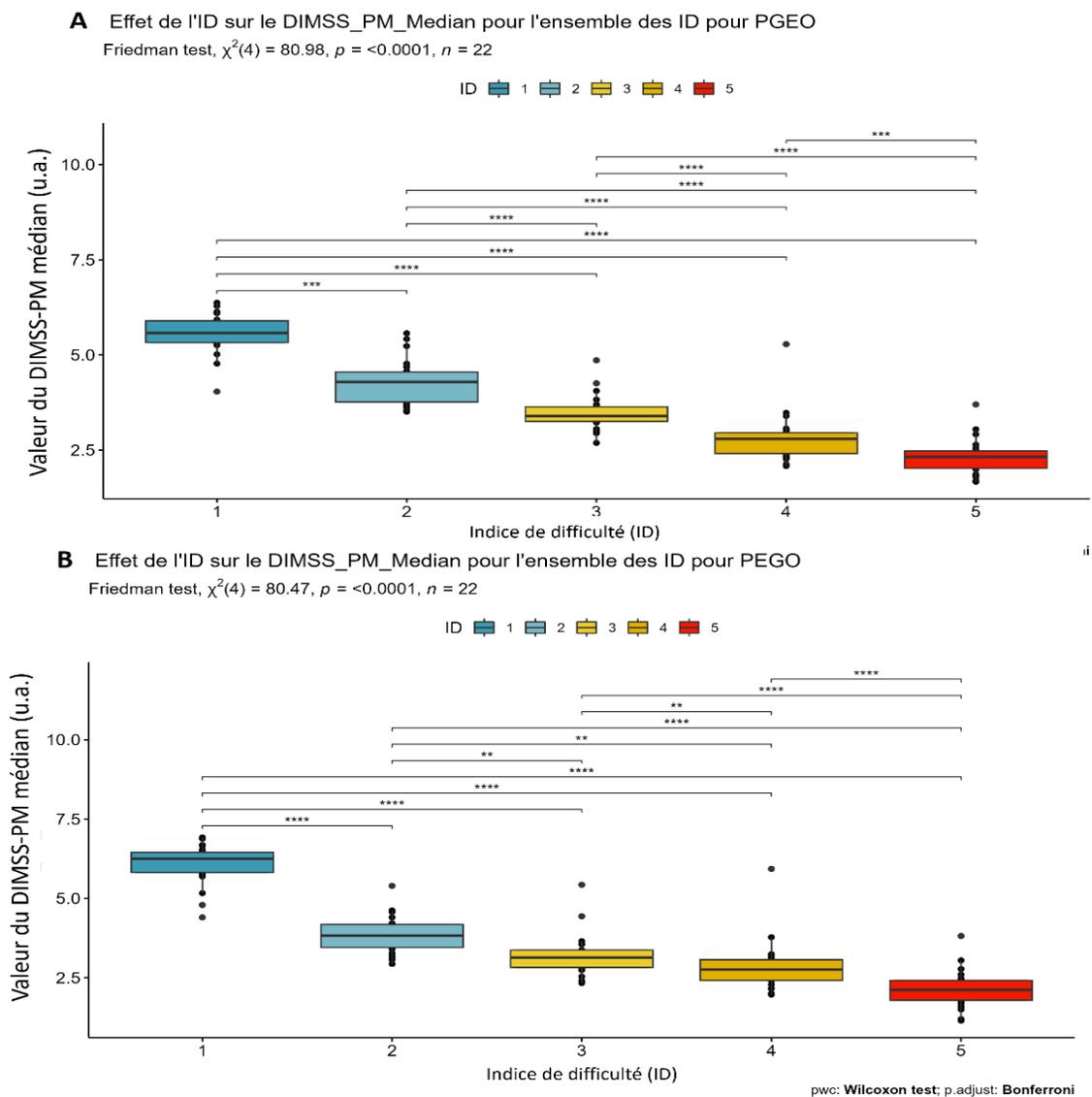


Figure 16 : Graphiques du DIMSS-PM en fonction de l'ID avec les résultats post hocs associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

Afin de tester cette hypothèse, l'évolution des scores du DIMSS-PM avec l'augmentation de l'ID a été explorée et une différence significative pour l'ensemble des

paires a été trouvée pour la condition géocentrée ( $X^2(4) = 80.981$   $p = 1.078 \times 10^{-16}$ ) et pour la condition égocentrée ( $X^2(4) = 80.47$ ,  $p = 1.38 \times 10^{-16}$ ).

Ces résultats semblent indiquer une diminution de la charge de travail avec l'augmentation de l'ID pour les deux référentiels. Ces résultats sont en contradiction avec les résultats des réponses subjectives des participants pour les deux conditions

### 3.3. Stratégie motrice : performance de la tâche et performance de la cinématique du mouvement

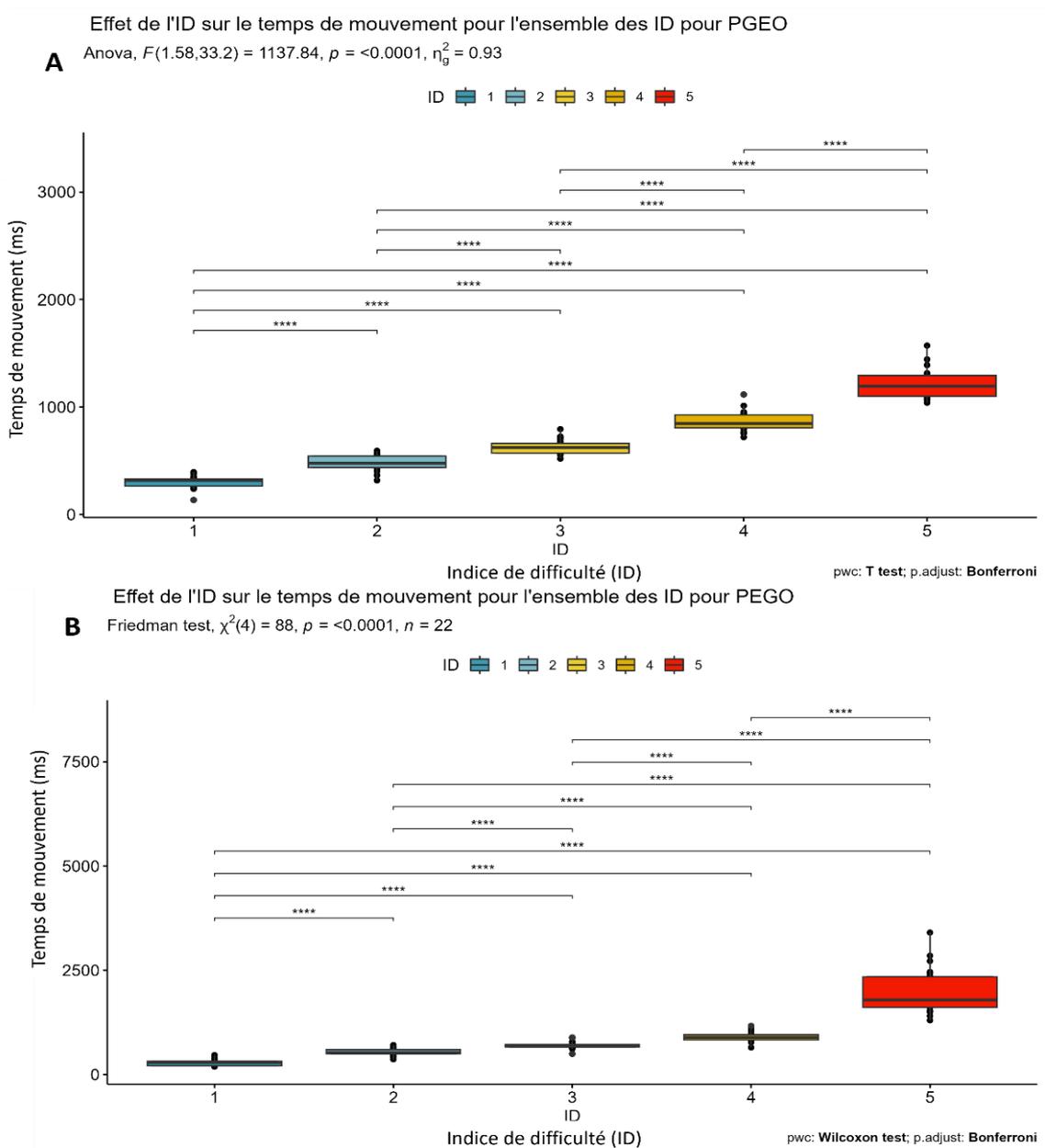


Figure 17 : Graphiques du Temps de mouvement (TM) en fonction de la difficulté de la tâche avec les effets associés pour le référentiel géocentrée (A) et égocentrée (B)

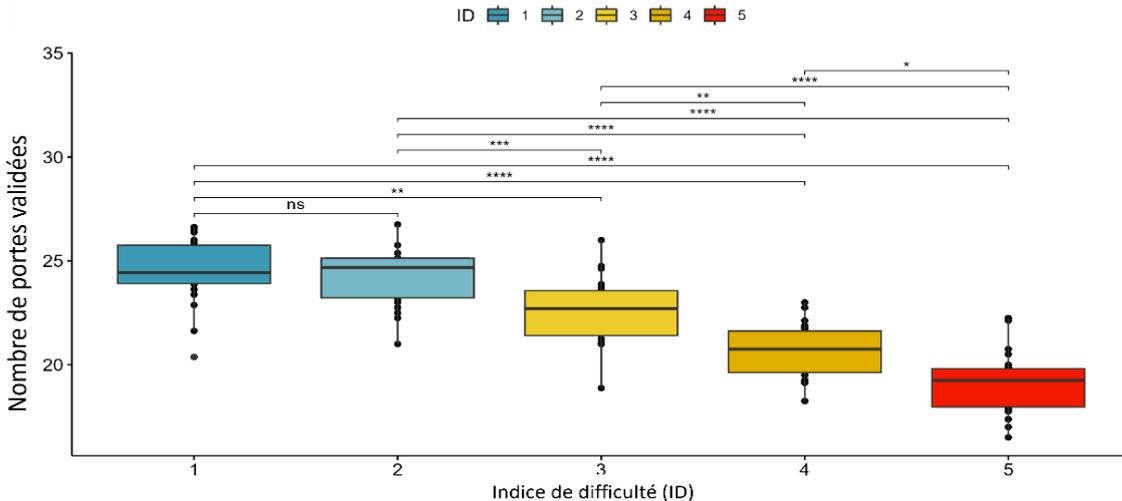
Nous allons à présent considérer les métriques de performance (tâche et mouvement). Dans ces deux expériences, l'hypothèse faite est que la performance se dégrade avec l'augmentation de l'ID (voir Figure 17).

Concernant l'effet de l'ID sur la performance de la tâche, en condition géocentrée, une diminution significative de la performance (i.e. nombre de cibles validées) avec l'augmentation de l'ID a été observée ( $F(4,84) = 60.644, p = 1.21 \times 10^{-20}$ ). Le test post-hoc montre des différences significatives entre toutes les paires d'ID sauf pour la paire ID1-ID2. En condition égocentrée, une diminution significative de la performance avec l'augmentation de l'ID a été remarquée ( $F(4,84) = 36.21, p = 2.6 \times 10^{-15}$ ) avec des différences significatives pour les paires ID1-ID5, ID2-ID5, ID3-ID5 et ID4-ID5.

Concernant le temps de mouvement (TM), pour la condition géocentrée une augmentation significative du TM avec l'augmentation de l'ID a été observée ( $F(4,84) = 1137.835, p = 5.8 \times 10^{-30}$ ), avec des différences significatives entre toutes les paires d'ID. Nous retrouvons le même résultat pour la condition égocentrée ( $\chi^2(4) = 88, p = 3.50 \times 10^{-18}$ ).

**A** Effet de l'ID sur le nombre de cibles validées pour l'ensemble des ID pour PGEO

Anova,  $F(4,84) = 60.64, p < 0.0001, \eta_g^2 = 0.68$



**B** Effet de l'ID sur le nombre de cibles validées pour l'ensemble des ID pour PEGO

Anova,  $F(4,84) = 36.21, p < 0.0001, \eta_g^2 = 0.52$

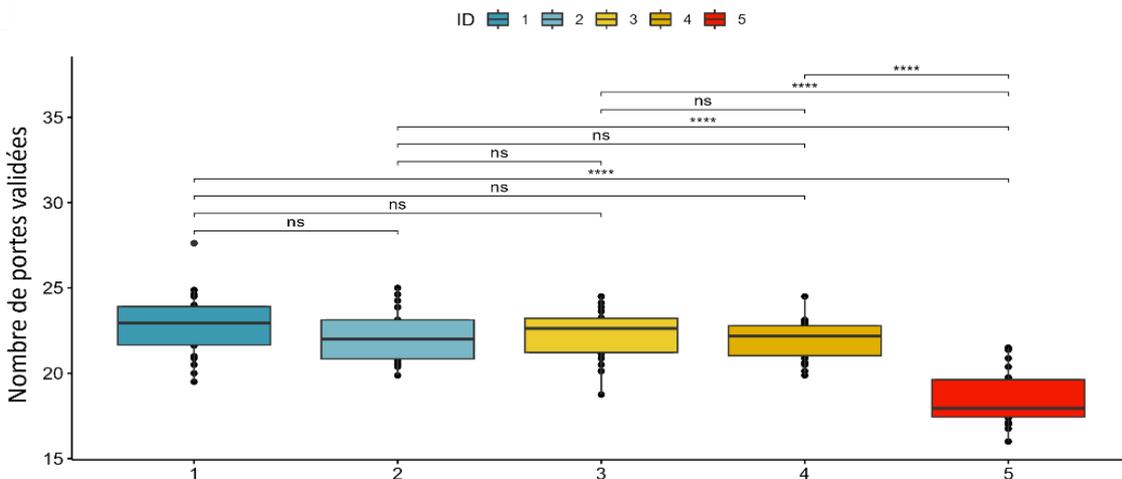


Figure 18 : Graphiques du nombre de portes validées en fonction de l'ID avec les résultats post-hoc associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

En d'autres termes, la performance diminue avec l'indice de difficulté (i.e., les participants mettent plus de temps à effectuer la tâche), voir Figure 22 A et B.

Pris ensemble, ces résultats (i.e. nombres de cibles validées et TM) indiquent :

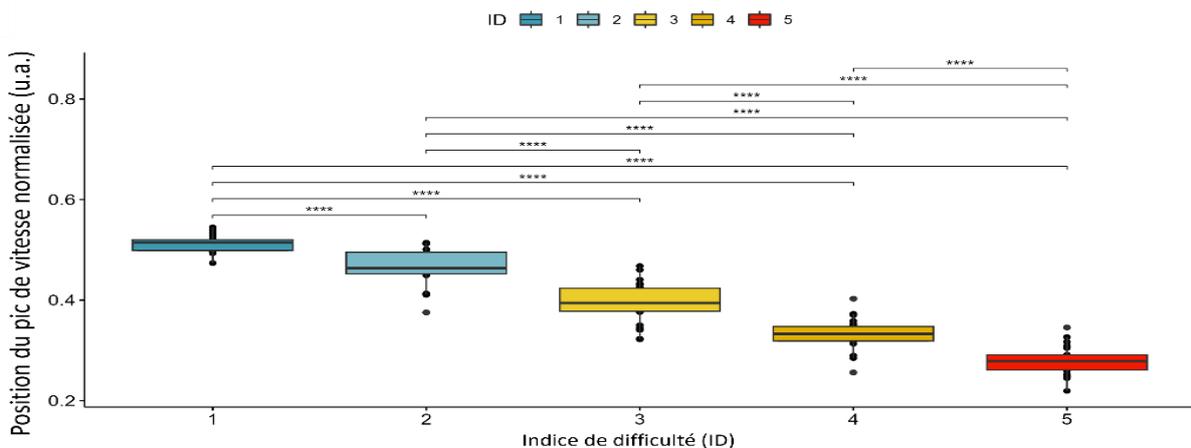
- Pour les deux conditions, une diminution de la performance avec l'augmentation de l'ID.
- Pour la condition égocentrée, une performance de la tâche dégradée uniquement entre les IDs et l'ID5.

### 3.4. Stratégie motrice : cinématique du mouvement

Dans ces deux expériences, nous avons fait l'hypothèse que la cinématique du mouvement se modifie avec l'augmentation de l'ID.

Nous allons présenter les résultats concernant l'effet de l'ID sur les différentes mesures de la cinématique du mouvement (pic de vitesse et durée de la phase d'accélération) (voir Figure 19).

**A** Effet de l'ID sur la position du pic de vitesse pour l'ensemble des ID pour PGE0  
Anova,  $F(2.62,55) = 491.21$ ,  $p < 0.0001$ ,  $\eta_p^2 = 0.88$



**B** Effet de l'ID sur la position du pic de vitesse pour l'ensemble des ID pour PEGO  
Friedman test,  $\chi^2(4) = 88$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 22$

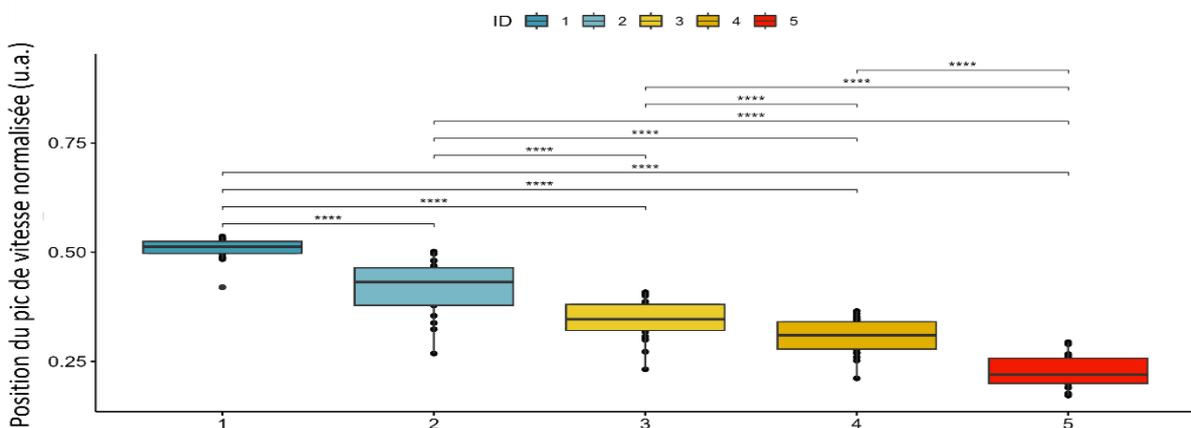


Figure 19: Graphiques du positionnement du pic de vitesse en fonction de la difficulté de la tâche avec les effets associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

Un déplacement de la position du pic de vitesse a été constaté i.e. que le pic de vitesse arrive plus tôt dans le mouvement avec l'augmentation de l'ID ( $F(4,84) = 491.215, p=2.21^{-38}$ , pour toutes les paires) pour la condition géocentrée, et de façon identique en condition égocentrée ( $X^2(4)=88, p=3.50^{-18}$ , pour toutes les paires).

La durée de la phase d'accélération diminue significativement avec l'augmentation de l'ID ( $F(4,84) = 248.603, p=2.51^{-20}$ , pour toutes les paires) en condition géocentrée et de la même manière en condition égocentrée ( $X^2(4)=66.50, p=1237^{-13}$ , toutes les paires sauf pour la paire ID3-ID4). De façon similaire, nous observons une diminution de la valeur du pic de vitesse ( $X^2(4)= 77.277, p=6.584^{-16}$ , pour toutes les paires) pour la condition géocentrée comme pour la condition égocentrée ( $F(4,84)=108.808, p=2.2^{-14}$ , sauf pour la paire ID3-ID4).

De plus, les portraits de phases montrent le décalage du pic de vitesse sur les deux portions du mouvement (pronation et supination) pour les deux conditions. Une modification du pattern cinématique avec l'augmentation de l'ID est visible. Cette modification des patterns est en accord avec les données cinématiques telles que la durée de la phase d'accélération, la position et la valeur du pic de vitesse et le temps de mouvement (voir Figure 20) pour les deux référentiels.

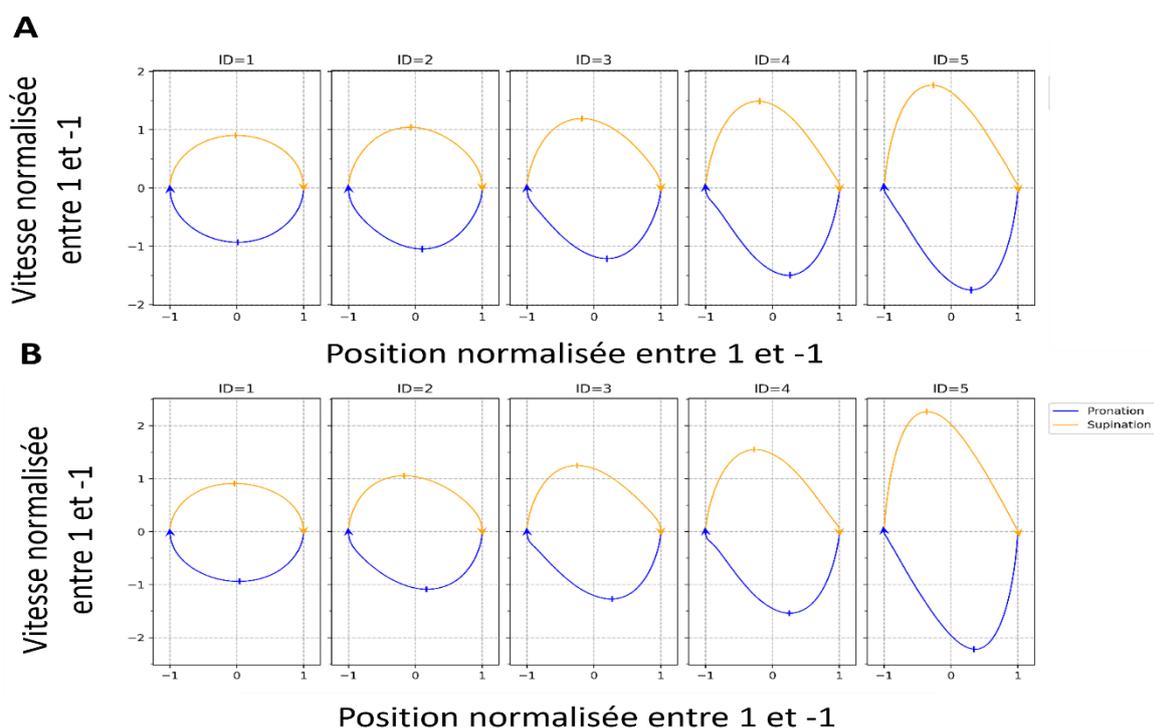


Figure 20 : Graphiques du (A) Portrait de phase (vitesse en fonction de la position) normalisé entre 1 et -1 en condition géocentrée et (B) en condition égocentrée. Avec en jaune le mouvement de supination et en bleu le mouvement de pronation.

Ces résultats semblent montrer des modifications de la cinématique du mouvement avec l'augmentation de l'ID pour les deux conditions (géocentrée et égocentrée). En effet, les stratégies motrices se modifient avec un pic de vitesse qui arrive plus tôt dans le mouvement, une durée de la phase d'accélération qui diminue et ce pour les deux types de mouvement (pronation et supination).

### 3.5. Relation entre la charge de travail, la performance et la cinématique avec l'augmentation de l'ID

Maintenant que nous avons vu comment évoluent les deux mesures de charge de travail, les mesures de performances et les mesures de caractérisation des stratégies motrices en fonction de l'ID pour les deux conditions. Nous allons étudier les relations des métriques liées à la performance et aux stratégies motrices vis-à-vis du NASA-TLX puis à l'égard du DIMSS-PM.

#### 3.5.1. Relation NASA-TLX et la performance du mouvement

Pour les deux conditions, la relation entre les différents scores du NASA-TLX et le TM (performance cinématique) a été étudiée (voir Figure 21).

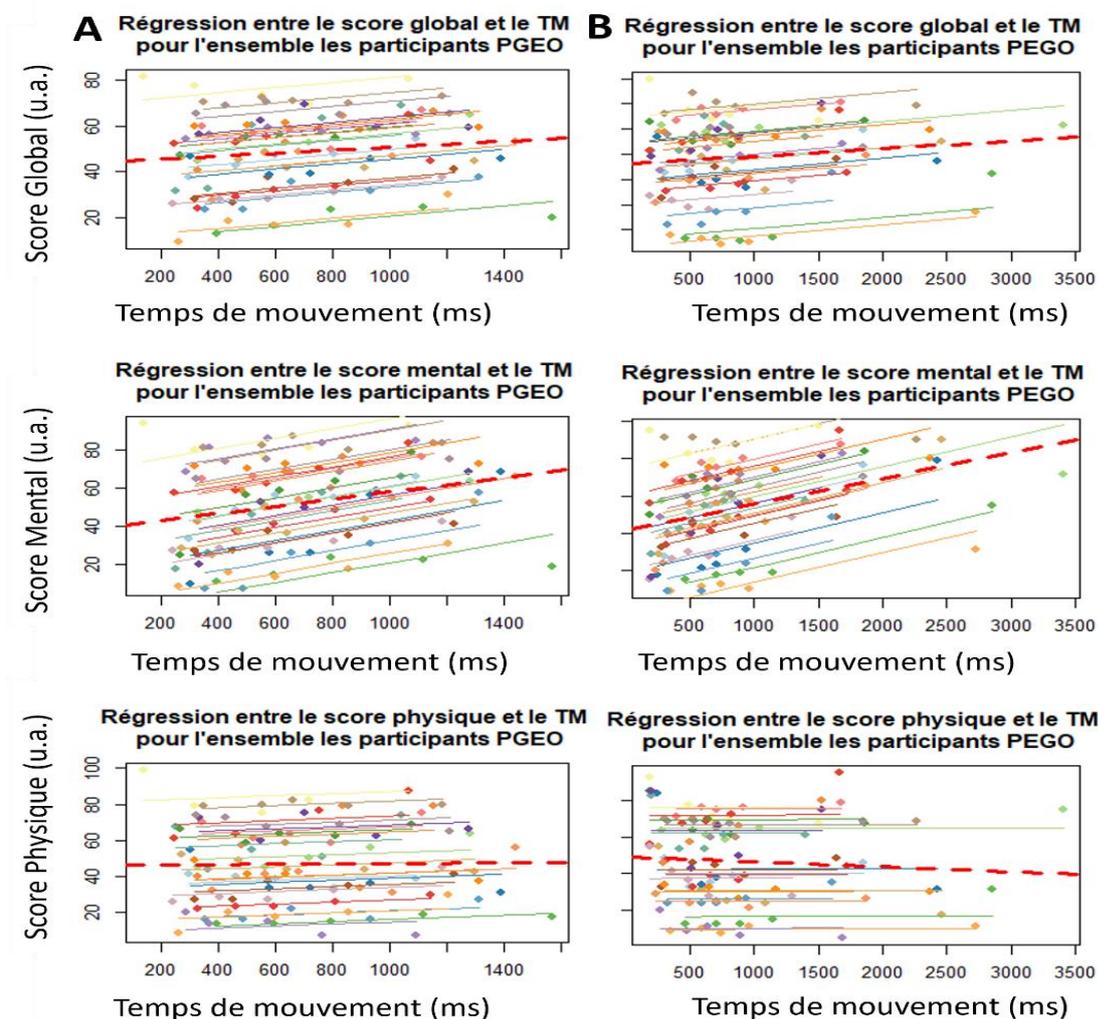


Figure 21 : Graphiques des (A) Régressions entre le TM et les sores du NASA-TLX pour le référentiel géocentré (B) Régressions entre le TM et les scores du NASA-TLX pour le référentiel égocentré.

Une corrélation moyenne entre le score « global » et le TM a été constatée pour les deux référentiels (condition géocentrée :  $r = 0.570, p = 5.551 \times 10^{-9}$  ; condition égocentrée :  $r = 0.471, p = 3.10 \times 10^{-6}$ ). Une corrélation forte entre le TM et le score « mental » a été observé

pour les deux référentiels (*condition géocentrée* :  $r=0.735$ ,  $p=2.200^{-16}$  ; pour la *condition égocentrée* :  $r=0.738$ ,  $p=1.476^{-16}$ ).

Enfin concernant le score « physique » et le TM, une corrélation faible en référentiel géocentrée ( $r=0.268$ ,  $p=0.0109$ ) a été déterminé alors qu'il n'y a pas de corrélation en condition égocentrée ( $r=0.009$ ,  $p=0.926$ ).

### 3.5.2. Relation NASA-TLX et Cinématique du mouvement

Nous avons étudié pour les deux conditions la relation entre les différents scores du NASA-TLX et la position du pic de vitesse (cinématique)(voir Figure 22).

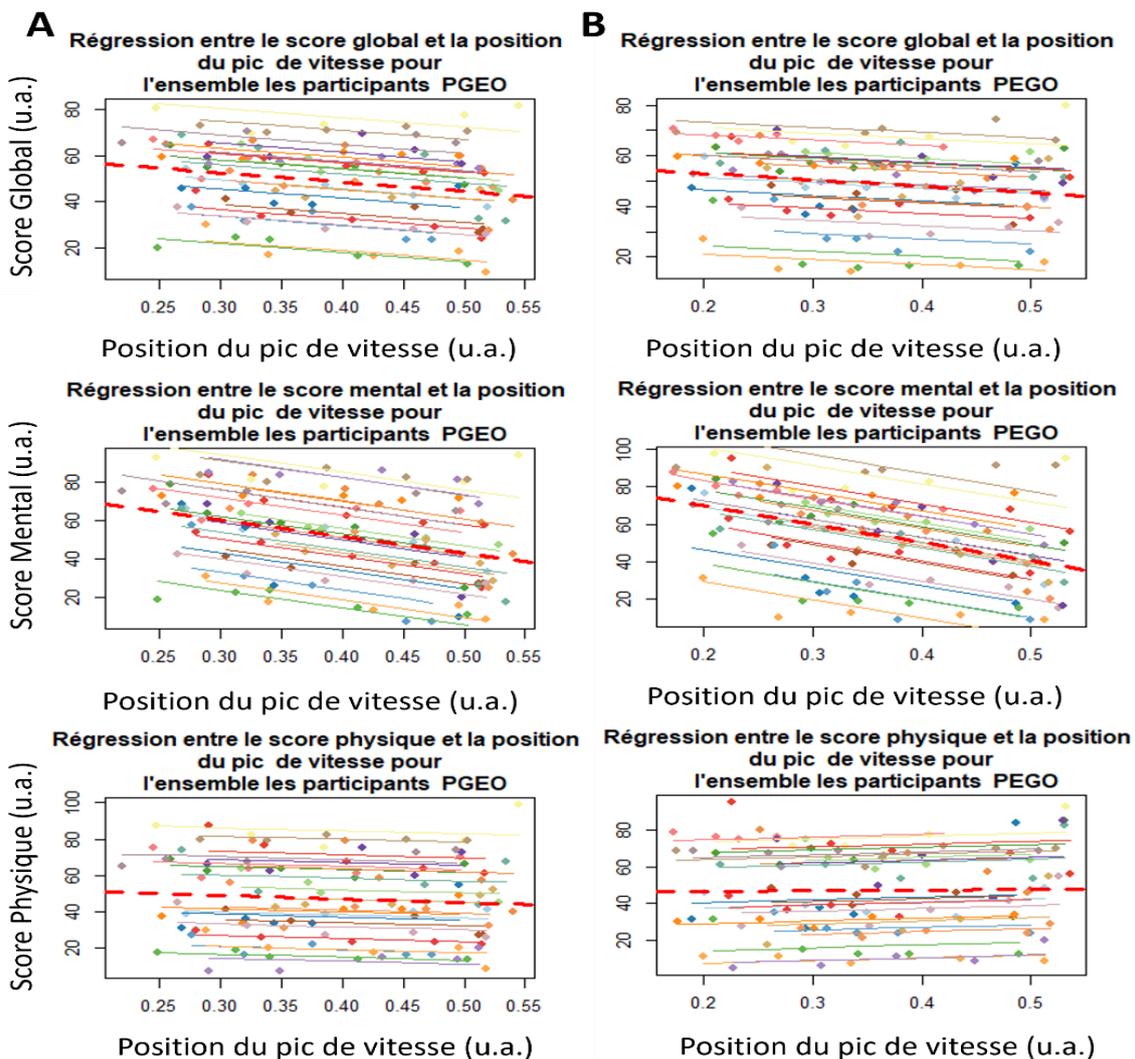


Figure 22 : Graphiques des (A) Régression entre la position du pic de vitesse et les scores du NASA-TLX pour le référentiel géocentrée, (B) Régression entre la position du pic de vitesse et les scores du NASA-TLX pour le référentiel égocentrée.

Nous constatons pour les deux référentiels une corrélation négative moyenne entre la position du pic de vitesse et le score « global » (*condition géocentrée* :  $r = -0.558$ ,  $p=1.295^{-08}$  ; pour la *condition égocentrée* :  $r = -0.358$ ,  $p=0.0005$ ).

Une forte corrélation négative entre la position du pic de vitesse et le score « mental » a été remarquée (condition géocentrée :  $r = -0.699$   $p=2.362^{-14}$  condition égocentrée :  $r = -0.720$   $p=1.631^{-15}$ ).

Pour le score « physique », une faible corrélation avec la position de vitesse est observable pour la condition géocentrée ( $r = -0.211$ ,  $p=0.0469$ ) et aucune corrélation pour la condition égocentrée ( $r = 0.161$ ,  $p=0.129$ ).

Ces résultats montrent que la relation entre les scores du NASA-TLX et la mesure de performance cinématique (TM) semblent avoir des sensibilités différentes en fonction du type de score lors de l'augmentation de l'ID pour les deux référentiels.

Le score « mental » semble être le plus sensible à la manipulation de la quantité d'information à traiter (ID). La relation entre la performance cinématique et le NASA-TLX montre une forte corrélation positive entre le score « mental » du NASA-TLX et le TM pour les deux référentiels. Concernant le score « global », il y a une sensibilité moyenne à l'augmentation de la charge cognitive dans notre tâche pour les deux référentiels. Pour le score « physique », des faibles relations sont retrouvés en référentiel égocentrée tandis qu'en référentiel géocentrée aucune relation entre la performance cinématique et le score « physique » a été observée.

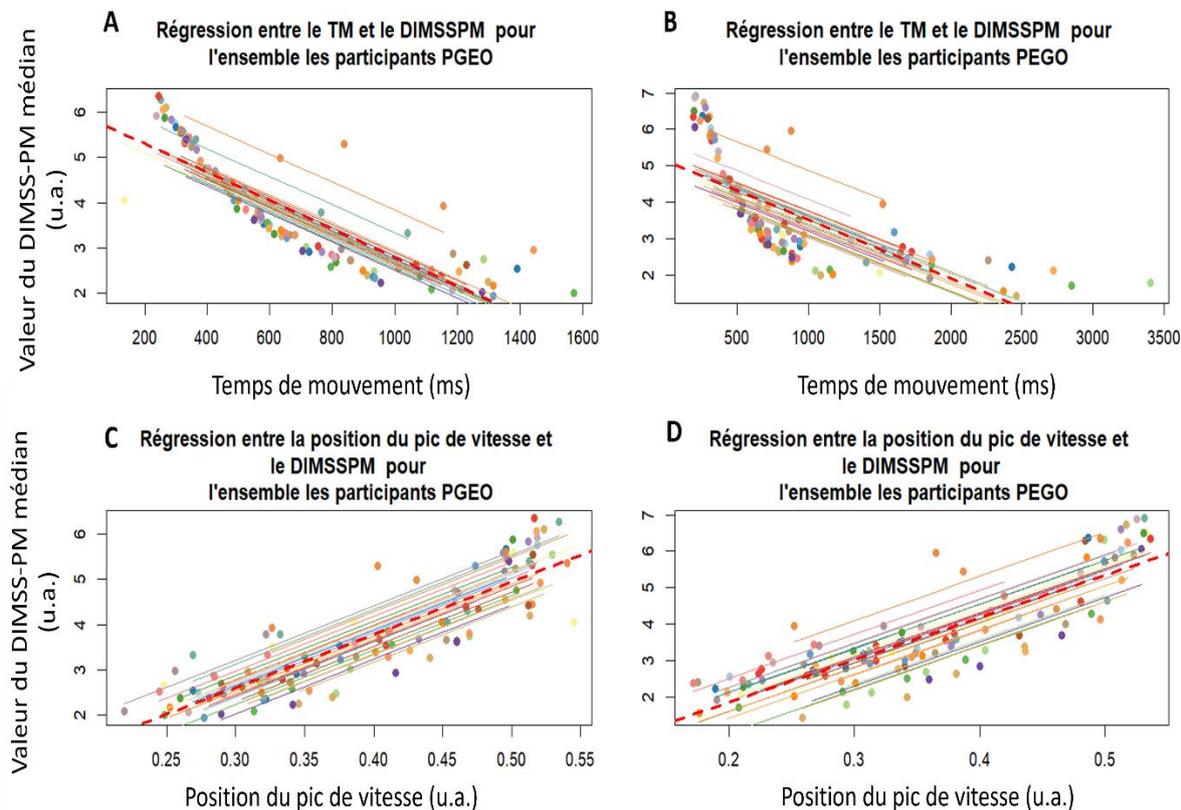
Pour l'ensemble des conditions, il existe des relations fortes entre le score « mental » du NASA-TLX et la position du pic de vitesse par une forte corrélation négative entre les deux pour les deux référentiels. Cette forte corrélation négative signifie que lorsque le pic de vitesse diminue le score « mental » augmente, ce qui se caractérise par une position du pic de vitesse qui arrive plus tôt. Nous retrouvons ce décalage du pic de vitesse sur les portraits de phase. Une corrélation négative moyenne a été observée entre le score « global » et la position du pic de vitesse. Cette relation pourrait être le résultat de l'influence de la dimension Exigence mentale, tout comme pour la relation avec la performance cinématique, une analyse des différentes dimensions pourrait permettre de d'affirmer quelle dimension influence le plus la relation.

### 3.5.3. Relation DIMSS-PM / Cinématique

Maintenant que nous avons déterminé, pour nos deux conditions, les relations entre les scores du NASA-TLX et les métriques liées au mouvement (performance et stratégies motrices), nous allons déterminer les relations entre ces métriques et le DIMSS-PM.

Nous constatons pour les deux conditions une forte corrélation négative entre le DIMSS-PM et le TM (condition géocentrée :  $r = -0.8715$ ,  $p=1.135^{-28}$  ; condition égocentrée :  $r = -0.710$ ,  $p=6.079^{-15}$ ), ce qui signifie que lorsque la performance se dégrade (i.e. TM augmente), le DIMSS-PM diminue suggérant une diminution de la charge cognitive (voir Figure 23).

Une forte corrélation positive entre le DIMSS-PM et la position du pic de vitesse a été observée pour les deux conditions (condition géocentrée :  $r = 0.91$   $p=2.288^{-35}$  ; condition égocentrée :  $r = 0.904$ ,  $p=5.00^{-34}$ ), ce qui signifie que lorsque le DIMSS-PM diminue la position du pic de vitesse diminue. La diminution de la position du pic de vitesse correspond aussi à la modification du mouvement (i.e. un ID élevé).



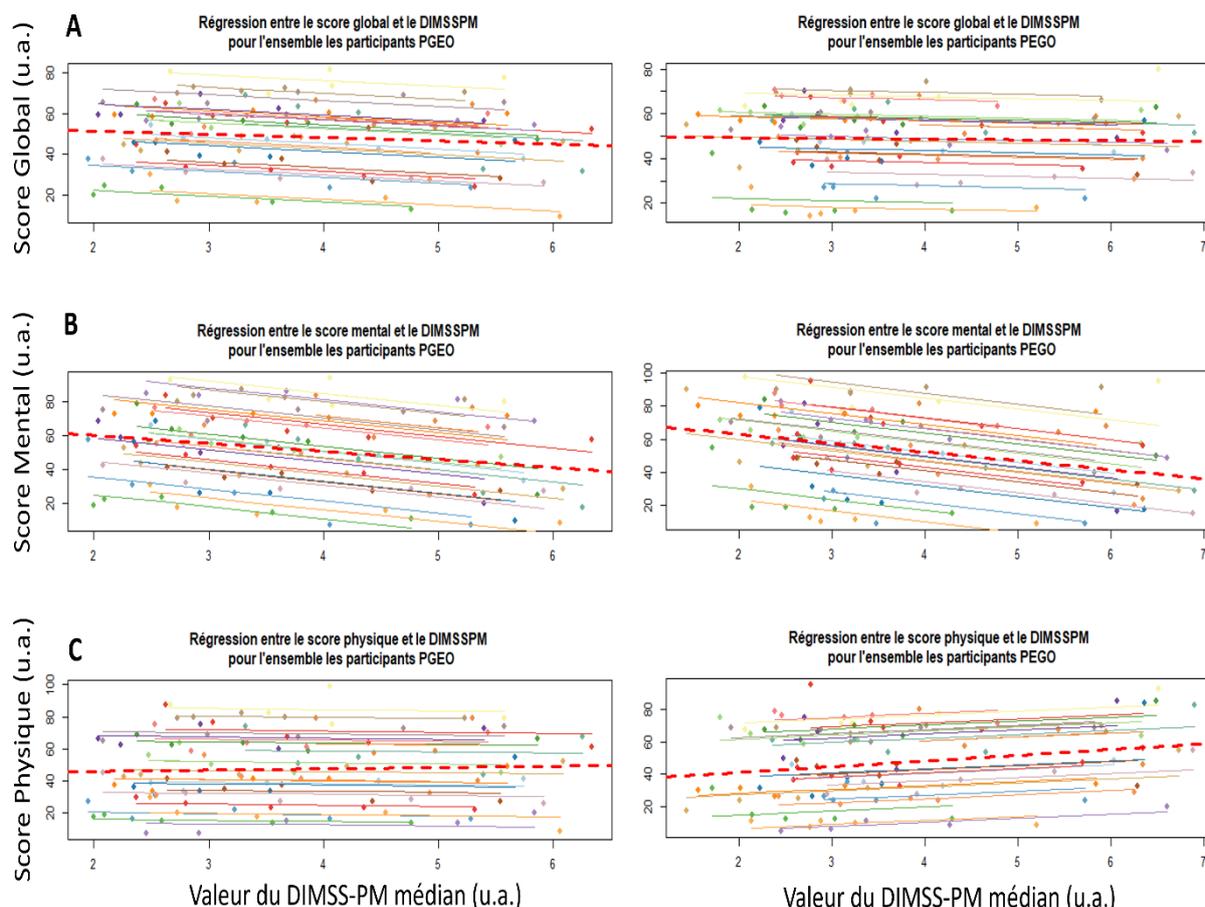
*Figure 23* : (A) Graphique de la régression entre le DIMSS-PM et le temps de mouvement TM en référentiel géocentré et (B) en référentiel égocentré. (C) Graphique de la régression entre le DIMSS-PM et la position du pic de vitesse en référentiel géocentré et (D) en référentiel égocentré.

Ces deux résultats montrent que le DIMSS-PM ne semble pas évaluer la charge cognitive dans notre tâche mais la quantité de mouvement. En effet, un DIMSS-PM élevé correspond à des mouvements de contrôle à haute fréquence du mouvement ou de grande amplitude, cette mesure semble plutôt refléter la charge physique inhérente au mouvement (ici la vitesse du mouvement).

Les résultats précédents requièrent une vérification de notre interprétation en établissant la relation entre les scores du NASA-TLX et du DIMSS-PM (voir Figure 24).

Pour le référentiel géocentré, une corrélation négative moyenne entre le DIMSS-PM et le score « global » a été remarquée ( $r = -0.526$ ,  $p = 1.148 \times 10^{-7}$ ) tandis que pour le référentiel égocentré aucune relation a été trouvée ( $r = -0.203$ ,  $p = 0.055$ ). Concernant le score « mental », pour les deux référentiels une forte corrélation négative a été constatée avec le DIMSS-PM Médian (condition géocentrée :  $r = -0.707$ ,  $p = 8.856 \times 10^{-15}$ ; condition égocentrée :  $r = -0.65$ ,  $p = 2.04 \times 10^{-12}$ ). Nous remarquons pour la condition géocentrée qu'il n'y a pas de corrélation entre le DIMSS-PM et le score « physique » ( $r = -0.113$ ,  $p = 0.289$ ) alors qu'en condition égocentrée nous trouvons une corrélation positive ( $r = 0.361$ ,  $p = 0.0004$ ).

Cette relation montre que le DIMSS-PM ne semble pas sensible à la charge cognitive dans notre tâche pour la condition géocentrée. En condition égocentrée, il est à noter qu'il semblerait que le DIMSS-PM soit sensible à la charge physique dans notre tâche.



*Figure 24 : (A) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score global du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite, (B) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score mental du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite, (C) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score physique du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite.*

En résumé, nos résultats montrent pour les deux conditions :

- Une dégradation de la performance,
- Une modification du pattern cinématique avec l'augmentation de l'ID,
- La présence de relation forte entre le temps de mouvement (TM) et le score « mental » du NASA-TLX ainsi qu'entre la position du pic de vitesse (PV) et le score « mental » du NASA-TLX. Par contre, nous avons des relations opposées entre le DIMSS-PM et TM puis le DIMSS-PM et le PV. Cela se traduit principalement par une sensibilité opposée du DIMSS-PM et du NASA-TLX envers l'ID. Toutefois, le DIMSS-PM semble peut adapter à notre tâche et il semble montrer une sensibilité à la charge physique pour la condition égocentrée.

3.6. Stratégie motrice : EMG activation musculaire

Nous nous sommes précédemment intéressés à l'impact de l'indice de difficulté sur les métriques de charge de travail, de performance et de cinématique. Maintenant, l'impact de l'ID sur les métriques électromyographiques a été étudié pour les deux conditions.

Pour mieux comprendre ce qu'il se passe au niveau musculaire, les résultats à l'échelle du niveau d'activation des différents muscles pour les deux conditions ont été observés. Pour les deux conditions, l'activité musculaire diminue significativement avec l'augmentation de l'ID pour chacun des quatre groupes musculaires (biceps brachial, triceps brachial, brachioradial et rond-pronateur). Les résultats sont visibles dans le Tableau 8 et Figure 25. Le maximum de l'activité musculaire et l'intégrale montrent les mêmes résultats.

Ces résultats montrent, que pour les deux conditions, l'intensité de l'activation musculaire diminue individuellement pour chaque muscle avec l'augmentation de l'ID.

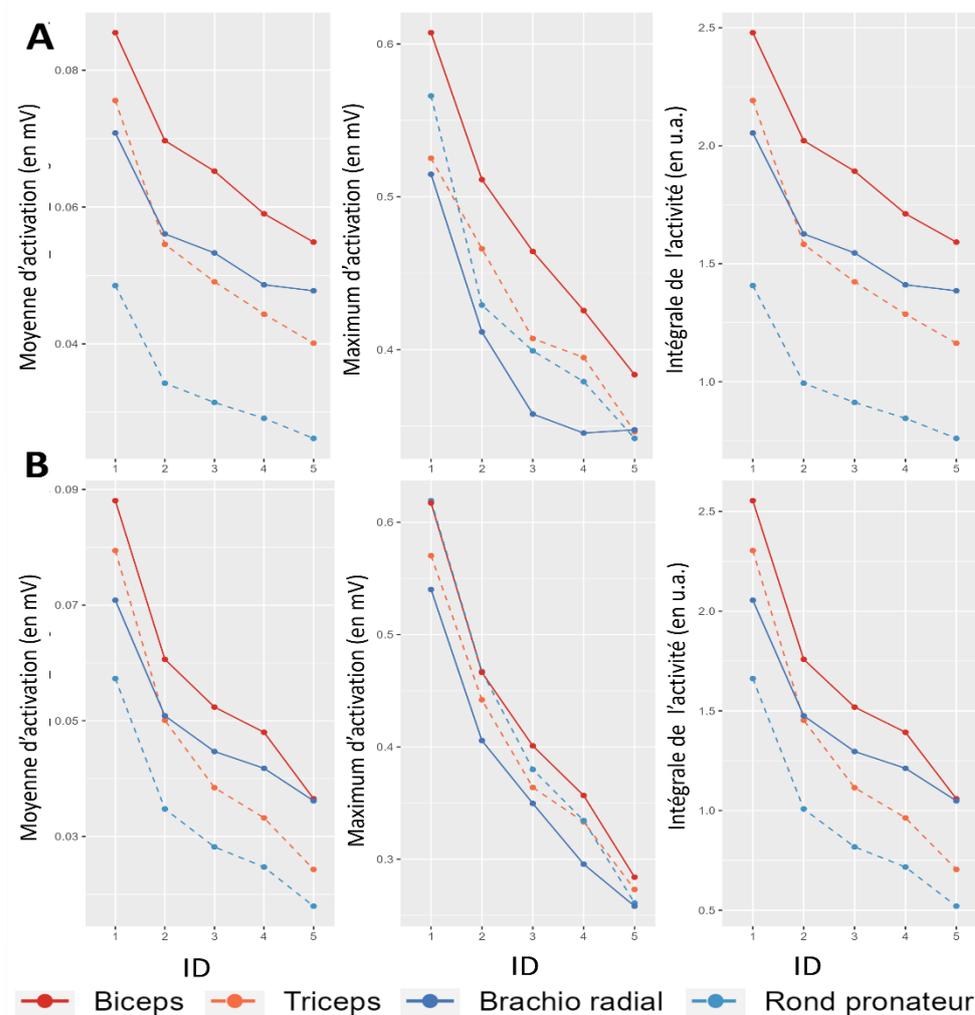


Figure 25 : Graphique représentant la moyenne d'activation, le maximum de l'activation et l'intégrale de l'activation pour chaque muscle en condition géocentrée (A) et en condition égocentrée (B).

*Tableau 8 : Tableau représentant les résultats statistiques de l'effet de l'ID sur l'activité musculaire moyenne ou maximale de chaque muscle.*

Muscle	Biceps	Triceps	Brachio-radial	Rond-pronateur
Activité musculaire Moyenne	$F(4,84)=44.687$ $p=4.5^{-12}$ $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}$	$F(4,84)=60.328, p=2.5^{-10}$ toutes les paires	$X^2(4)=60.472, p=2.30^{-12}$ , toutes sauf ID2-ID3	$F(4,84)=67.505, p=8.21^{-14}$ , toutes les paires
Activité musculaire maximale	$F(4,84)=20.937$ , $p=1.22^{-13}$ $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{3}{4}$	$F(4,84)=41.852$ , $p=1.14^{-11}$ $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}$	$F(4,84)=28.215, p=5.02^{-8}$ , $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}$	$F(4,84)=30.352, p=1.2^{-8}$ , $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{4}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}$
Intégrale de l'activité musculaire	$F(4,84)=44.712$ , $p=4.5^{-02}$ $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}$	$F(4,84)=60.307, p=2.53^{-10}$ Toutes les paires	$X^2(4)=60.47$ , $p=2.30^{-12}$ , toutes sauf ID2-ID3	$F(4,84)=67.522, p=8.25^{-14}$ , toutes les paires
Intégrale de l'activité musculaire avant le pic de Vitesse	$F(4,84)=23.545$ , $p=1.9^{-07}$ , $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}$ .	$F(4,84)=44.208, p=2.14^{-08}$ $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}$	$X^2(4)=27.09$ , $p=1.90^{-05}$ , $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}$	$X^2(4)=54.109, p=4.99^{-11}$ , $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}$
Intégrale de l'activité musculaire après le pic de Vitesse	$F(4,84)=51.342$ , $P=2.68^{-13}$ toutes les paires	$F(4,84)=64.729$ , $p=3.93^{-11}$ toutes les paires	$X^2(4)=65.78, p=1.76^{-13}$ , toutes les paires	$F(4,84)=85.084, p=4.5^{-16}$ , toutes les paires

### 3.7. Stratégie motrice : EMG co-activation

Maintenant, que l'impact de l'ID sur l'activité des muscles, séparément a été considéré, nous allons nous intéresser à la mesure de la co-activation musculaire pour chaque condition. Les graphiques présentés seront les courbes et non les boxplot contenant les post-hoc pour plus de compréhension.

Dans un premier temps, les résultats de co-activations sur les deux couples musculaires biceps brachial/triceps brachial puis rond-pronateur/brachioradial vont être présentés.

#### 3.7.1. Couple musculaire Biceps/Triceps

Nous commençons par les résultats du couple musculaire biceps brachial/triceps brachial. La co-activation a été étudiée au travers de 3 indices différents.

Dans un premier temps, la co-activation a été analysée par l'index de co-activation de Kellis. Dans un second temps, cette métrique a été observée par l'index de Ervilha. Dans un dernier temps, la valeur de la différence des intégrales a été étudiée.

Concernant l'effet de l'ID sur le coefficient de co-activation de Kellis pour les deux conditions, une augmentation de la co-activation a été constatée lorsque nous calculons l'index sur l'ensemble du mouvement (condition géocentrée :  $F(4,84) = 8.244$ ,  $p=0.00091$ , pour les paires ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID4 ; condition égocentrée :  $X^2(4)=16.10$ ,  $p=0.002$ ,

compléter pour les paires). En regardant de part et d'autre du pic de vitesse, nous observons une augmentation significative du niveau de co-activation entre l'ID 1 et 2 avant le pic de vitesse (condition géocentrée :  $F(4,84)=4.908$ ,  $p=0.011$  ; condition égocentrée :  $F(4,84)=5.604$ ,  $p=0.008$ ). En revanche, lorsque l'on considère le niveau de co-activation après le pic de vitesse, celui-ci augmente de manière beaucoup plus graduelle avec l'ID de sorte qu'une différence significative est observée (condition géocentrée :  $F(4,84) = 8.86$ ,  $p=0.00084$ , entre les paires ID1-ID4, ID2-ID3, ID2-ID4, ID2-ID5, ID3-ID4 ; condition égocentrée :  $X^2(4)=13.89$ ,  $p=0.007$ , compléter pour les paires), voir Figure 26.

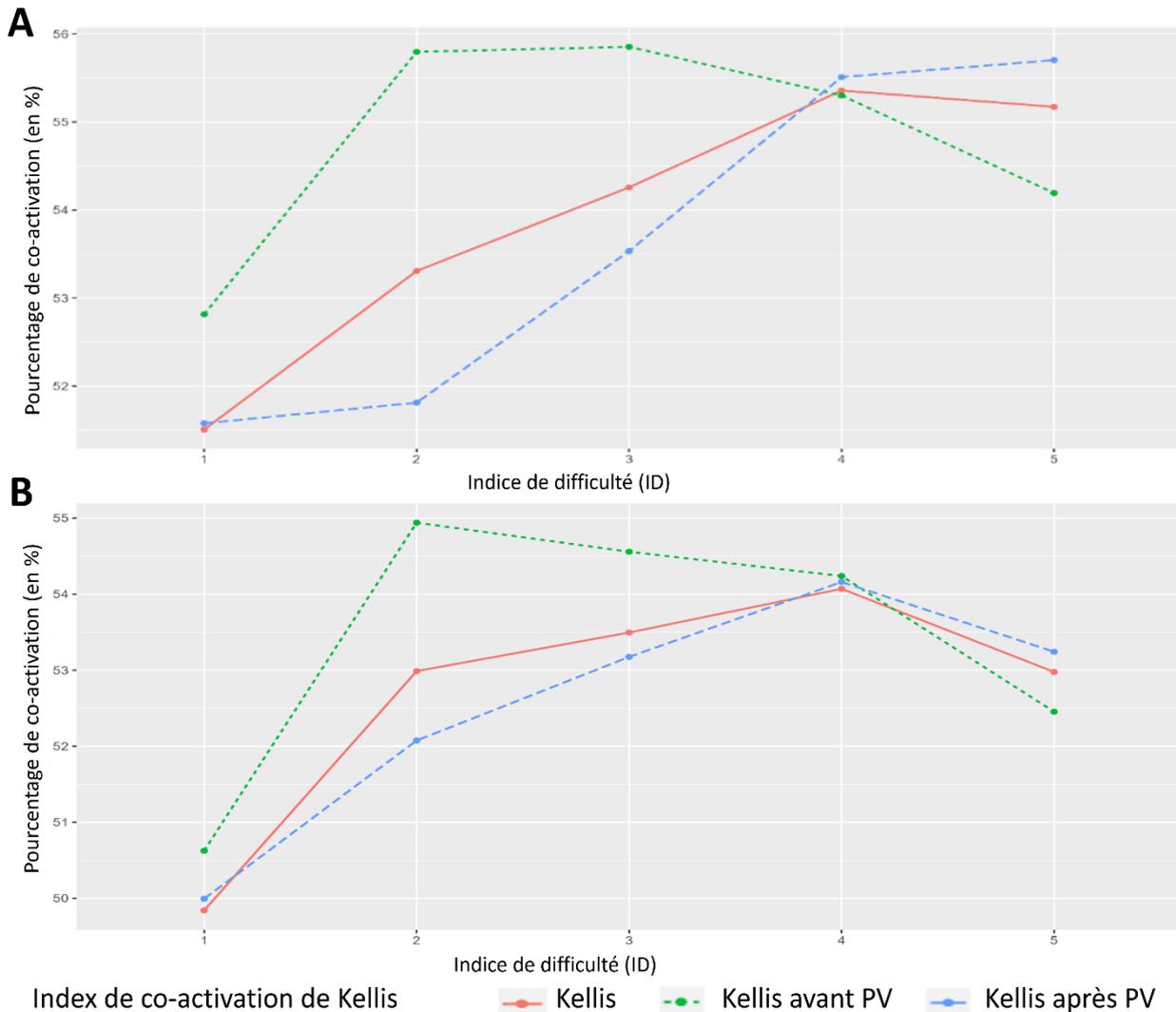


Figure 26 : Graphique représentant le coefficient de co-activation de Kellis moyen en fonction de l'ID, avec en rouge le coefficient calculé sur l'ensemble du demi-cycle, en vert le coefficient est calculé avant le pic de vitesse et en bleu après le pic de vitesse pour chaque ID en géocentrée (A) et égocentrée (B).

Ces résultats semblent indiquer :

- Pour la condition géocentrée : une augmentation de la co-activation en fonction de l'ID, après le pic de vitesse en particulier pour les ID2, ID3 et ID4.
- Pour la condition égocentrée : une augmentation de la co-activation avec l'ID uniquement entre l'ID1 et l'ID2 avant le pic de vitesse.

Concernant à présent l'effet de l'ID sur le coefficient de co-activation de Ervilha pour les deux conditions, une augmentation de la co-activation a été observée lorsque nous calculons l'index sur l'ensemble du mouvement (condition géocentrée :  $F(4,84) = 9.669$ ,  $p = 0.0051$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 23.2$ ,  $p = 0.0001$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3 et ID1-ID4). En regardant de part et d'autre du pic de vitesse, nous observons seulement un effet de l'ID avant le pic de vitesse (condition géocentrée :  $F(4,84) = 5.524$ ,  $p = 0.008$ , pour la paire ID1-ID2 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 14.83$ ,  $p = 0.005$ , pour la paire ID1-ID2), voir Figure 27.

En revanche, l'effet de l'ID sur notre métrique est plus progressif après le pic de vitesse avec une augmentation significative de la co-activation (condition géocentrée :  $F(4,84) = 14.166$ ,  $p = 5.32 \times 10^{-5}$ , pour les paires ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID3, ID2-ID4, ID2-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 24.29$ ,  $p = 6.98 \times 10^{-5}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3 et ID1-ID4).

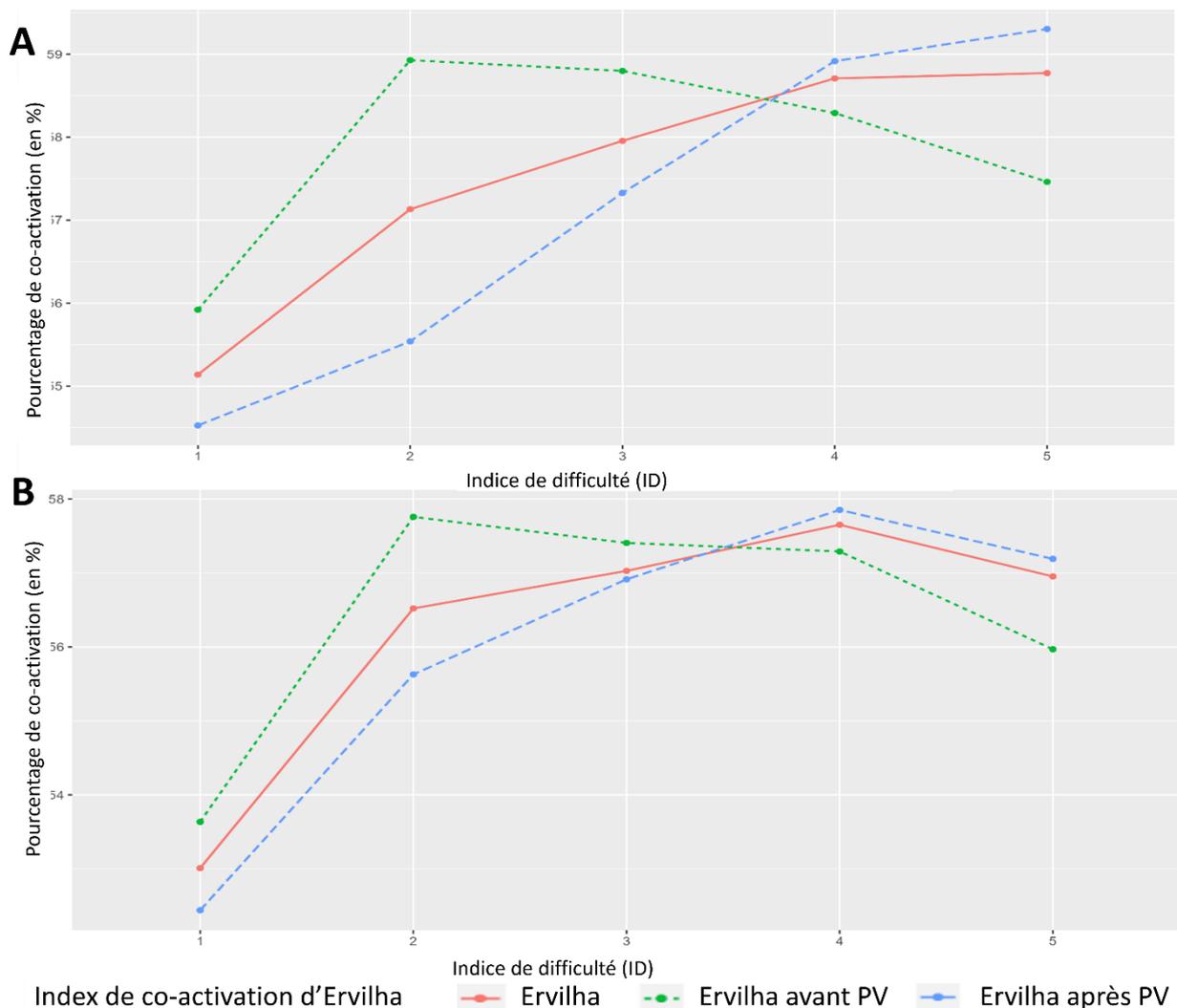
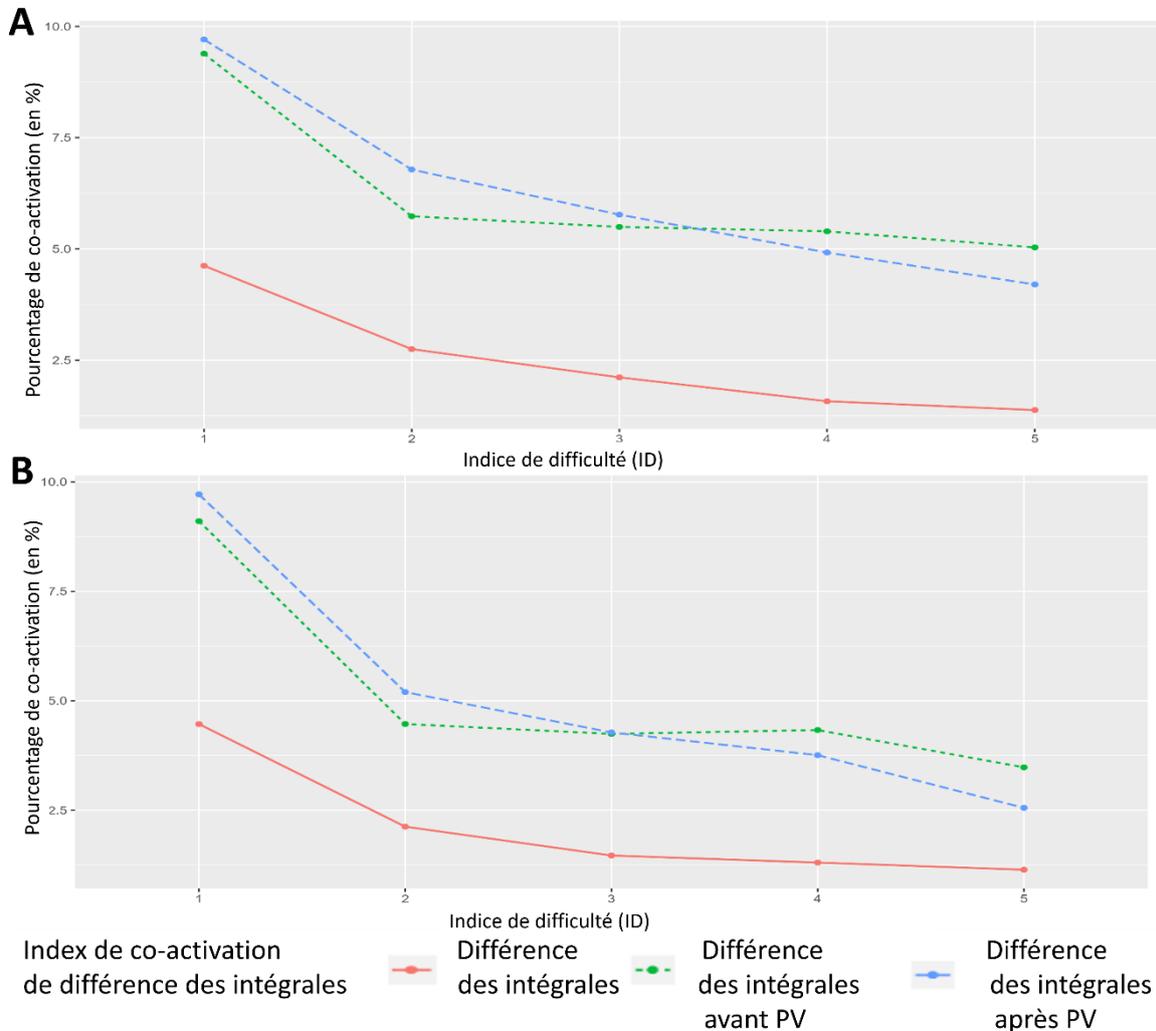


Figure 27 : Graphique représentant le coefficient de co-activation de Ervilha moyen en fonction de l'ID, avec en rouge le coefficient calculé sur l'ensemble du demi-cycle, en vert le coefficient est calculé avant le pic de vitesse et en bleu après le pic de vitesse pour chaque ID en géocentrée (A) et égocentrée (B).

Ce résultat indique une relation monotone de la co-activation en fonction de l'ID après le pic de vitesse.

Concernant l'effet de l'ID sur la mesure de la différence des intégrales de la différence agoniste/antagoniste sur les périodes avant/après le pic de vitesse pour les deux conditions, une diminution significative de la différence des intégrales a été constatée avec l'augmentation de l'ID (condition géocentrée :  $X^2(4) = 77.2$ ,  $p=6.82 \times 10^{-16}$ , pour toutes les paires sauf ID4-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 70.83$ ,  $p=1.51 \times 10^{-14}$ , ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID3, ID2-ID4 et ID2-ID5) voir Figure 28.



*Figure 28* : Graphique représentant en rouge la différence des intégrales de la différence agoniste/antagoniste avant – après le pic de vitesse, en vert l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste avant le pic de vitesse et en bleu l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentrée (A) et égocentrée (B).

Si nous observons de part et d'autre du pic de vitesse pour les deux référentiels, l'intégrale de la différence diminue avec l'augmentation de l'ID (condition géocentrée :  $X^2(4) = 36.2$ ,  $p=2.39 \times 10^{-7}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4)=48.8$ ,  $p=6.42 \times 10^{-10}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID3, ID2-ID5 et ID4-ID5) avant le pic de vitesse ; et nous avons également une diminution de la différence (condition géocentrée :  $F(4,84)=89.864$ ,  $p=2.11 \times 10^{-14}$ , pour toutes les paires ; condition égocentrée :  $X^2(4)=79.05$ ,  $p=2.76 \times 10^{-16}$ , pour toutes les paires) après le pic de vitesse.

Lorsque la différence d'activité entre l'agoniste et l'antagoniste diminue, cela signifie une augmentation du niveau de co-activation entre ces deux muscles. Nos résultats semblent montrer pour les deux référentiels une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID de façon plus franche après le pic de vitesse.

En résumé pour les deux conditions, ces résultats semblent montrer une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID pour le couple Biceps brachial/Triceps brachial. Majoritairement, les 3 types de mesures semblent en accord sur l'augmentation de la co-activation plus franche après le pic de vitesse.

### 3.7.2. Couple musculaire Brachio-radial/Rond-pronateur

Maintenant, nous allons présenter les résultats du couple musculaire brachioradial/rond-pronateur. La co-activation a été étudiée au travers des mêmes indices que pour le couple Biceps brachial/Triceps brachial.

Dans un premier temps, les résultats concernant l'effet de l'ID le coefficient de co-activation de Kellis vont être présentés (voir Figure 29).

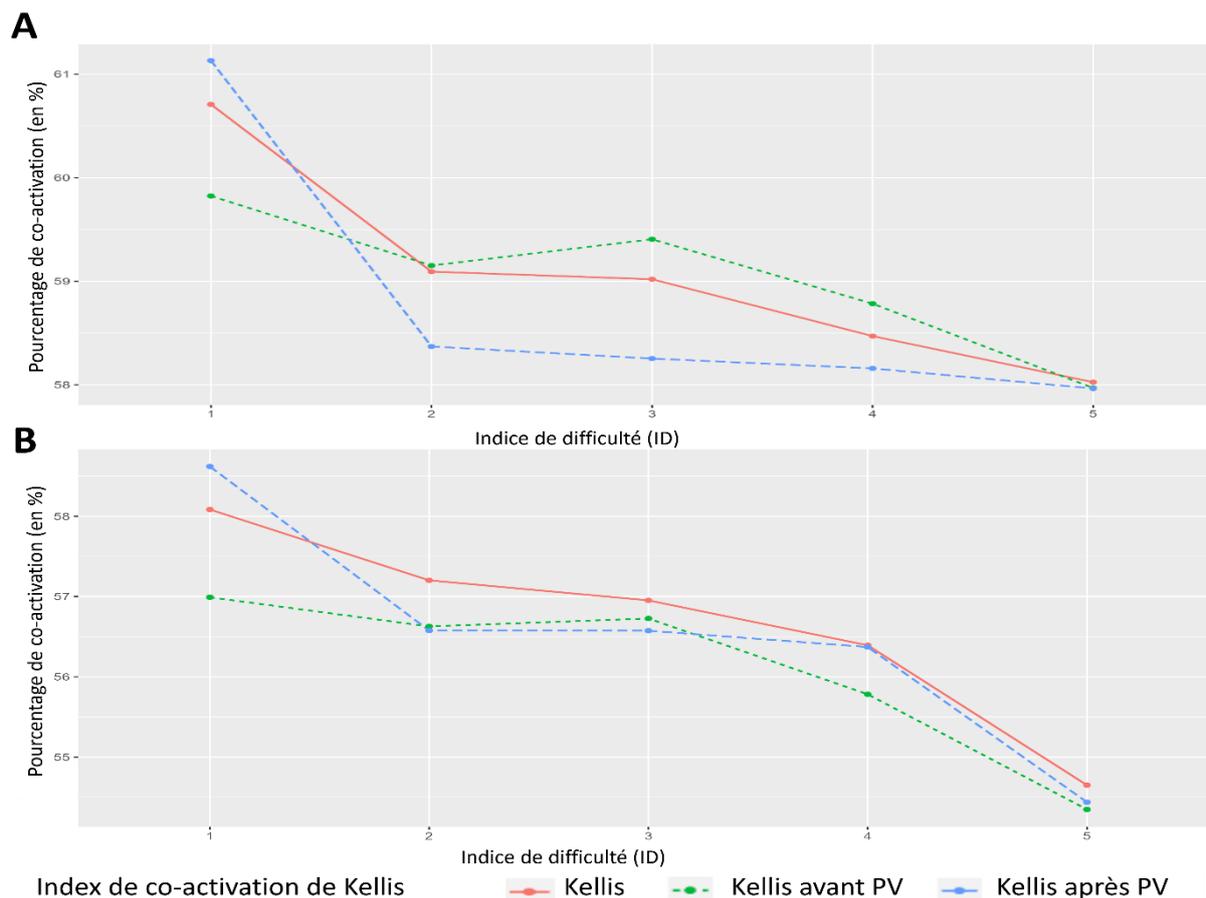
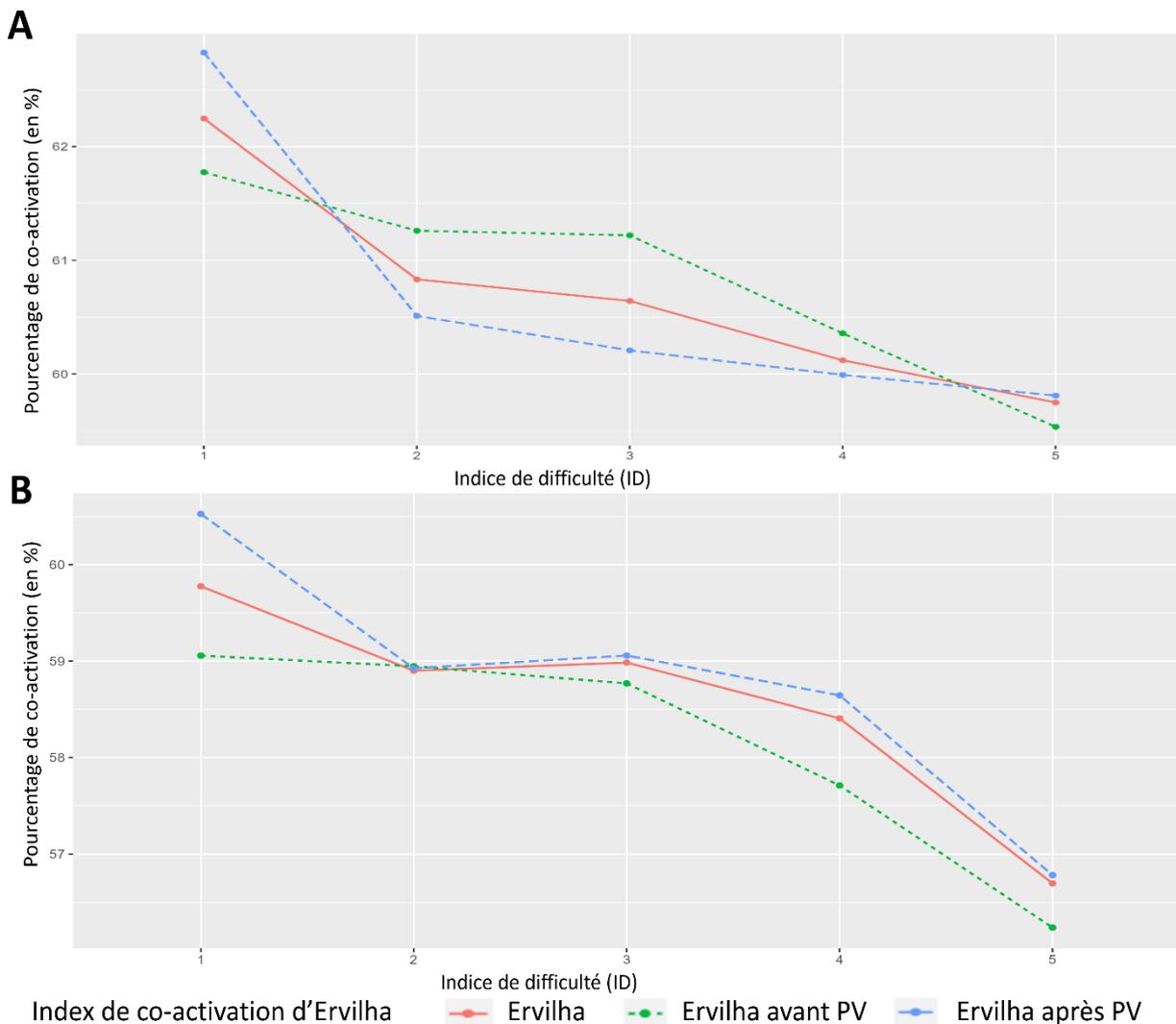


Figure 29 : Graphique représentant en rouge le pourcentage de co-activation de Kellis sur tout le mouvement, en vert le pourcentage de co-activation de Kellis avant le pic de vitesse et en bleu le pourcentage de co-activation de Kellis après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B).

Aucun effet significatif a été observé sur l'ensemble du mouvement pour les deux référentiels (condition géocentrée :  $F(4,84) = 3.30, p=0.507$  ; condition égocentrée :  $X^2(4)=1.527, p=0.82$ ). De part et d'autre du pic de vitesse, aucun effet de l'ID a été constaté avant le pic de vitesse (condition géocentrée :  $X^2(4) = 2.581, p=0.63$  ; condition égocentrée :  $F(4,84) = 1.434, p=0.251$ ) et après le pic de vitesse (condition géocentrée :  $F(4,84) = 3.107, p=0.073$  ; condition égocentrée :  $F(4,84) = 2.188, p=0.129$ ), voir Figure 30.

Ces résultats semblent montrer que, pour ce couple musculaire, l'augmentation de l'ID n'a pas d'effet sur cet index de co-activation pour les deux conditions. En d'autres termes, quel que soit le niveau de difficulté de la tâche, le couple musculaire brachioradial/rond-pronateur ne présente aucune différence significative sur le pourcentage de co-activation.

Dans un second temps, nous allons présenter les résultats concernant l'effet de l'ID le coefficient de co-activation de Ervilha.

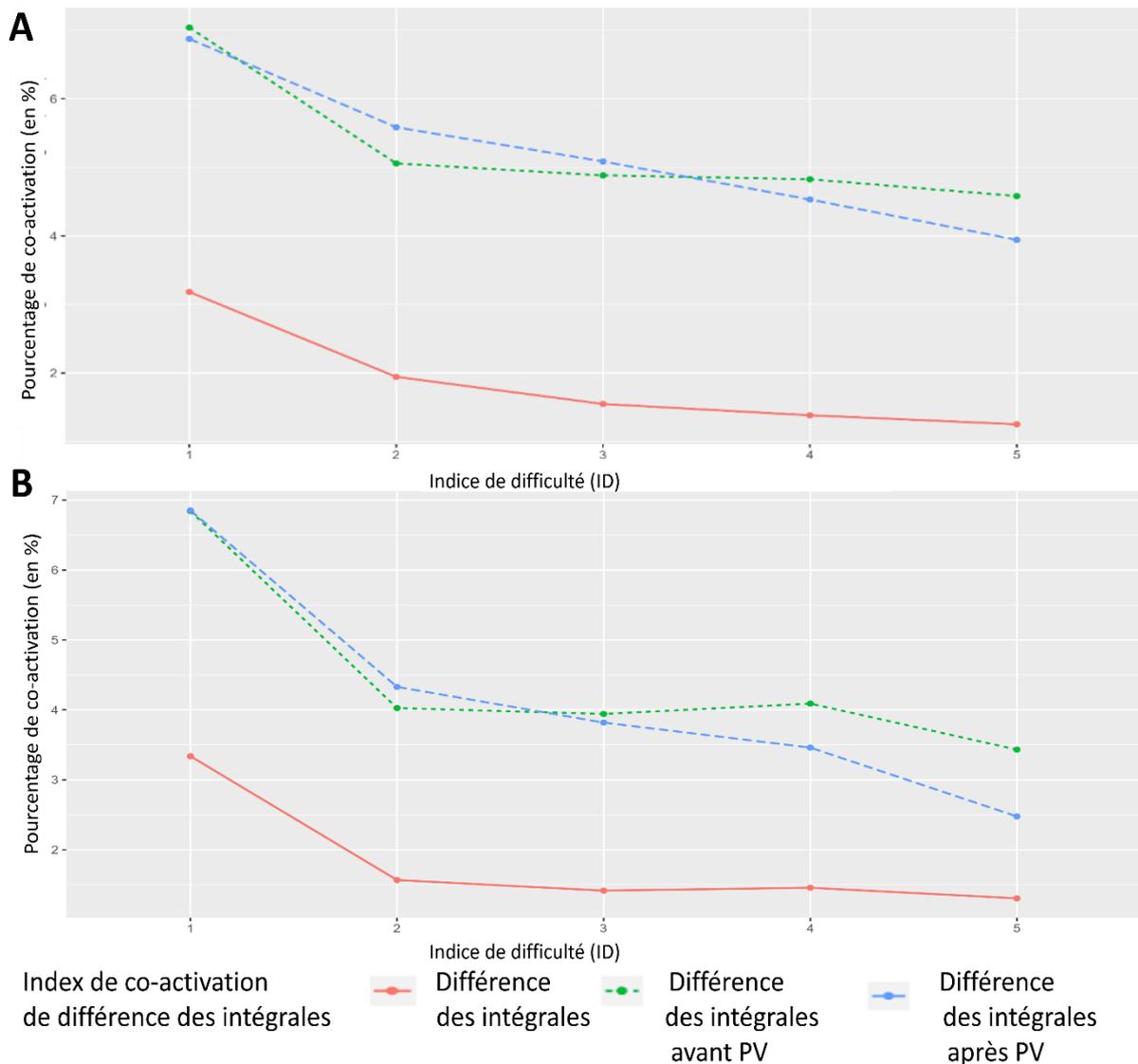


*Figure 30 : Graphique représentant en rouge le pourcentage de co-activation de Ervilha sur tout le mouvement, en vert le pourcentage de co-activation de Ervilha avant le pic de vitesse et en bleu le pourcentage de co-activation de Ervilha après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B).*

Aucune différence de la co-activation a été remarquée lorsque nous calculons l'index sur l'ensemble du mouvement pour les deux référentiels (condition géocentrée :  $X^2(4) = 2.8, p=0.591$  ; condition égocentrée :  $F(4,84)=1.694, p=0.203$ ). De part et d'autre du pic de vitesse, aucun effet de l'ID a été remarqué sur l'index de co-activation avant le pic de vitesse (condition géocentrée :  $X^2(4) = 4.254, p=0.372$  ; condition égocentrée :  $F(4,84)=1.995, p=0.159$ ) et après le pic de vitesse (condition géocentrée :  $X^2(4) = 8.8, p=0.066$  ; condition égocentrée :  $F(4,84) = 2.128, p=0.144$ ), voir Figure 31.

Ces résultats ne semblent montrer aucun effet de l'ID sur l'index de co-activation de Ervilha pour les deux conditions.

Pour finir, nous allons présenter les résultats concernant l'effet de l'ID sur la mesure de la différence des intégrales sur les périodes avant/après le pic de vitesse pour les deux référentiels.



*Figure 31* : Graphique représentant en rouge la différence des intégrales de la différence agoniste/antagoniste avant – après le pic de vitesse, en vert l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste avant le pic de vitesse et en bleu l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentrée (A) et égocentrée (B).

Pour les deux référentiels, une diminution de la différence des intégrales avec l'augmentation de l'ID a été constatée (condition géocentrée :  $X^2(4) = 55.70$ ,  $p = 2.307 \times 10^{-11}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID3, ID2-ID4, ID2-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 42.58$ ,  $p = 1.26 \times 10^{-8}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5). Ces résultats signifient que la différence entre l'agoniste et l'antagoniste avant et après le pic de vitesse diminue i.e. que les deux muscles co-activent. Il semble y avoir une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID sauf entre les ID3 à ID5 pour la condition géocentrée et pour toutes les paires pour la condition égocentrée.

Si nous observons de part et d'autre du pic de vitesse pour les deux conditions, la différence des intégrales diminue avec l'ID avant le pic de vitesse (condition géocentrée :  $X^2(4) = 30.109$ ,  $p = 4.65 \times 10^{-6}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5 ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 39.89$ ,  $p = 4.55 \times 10^{-8}$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5 et ID4-ID5); et nous avons également une diminution de la différence des intégrales après le pic de vitesse (condition géocentrée :  $X^2(4) = 60.32$ ,  $p = 2.47 \times 10^{-12}$ , pour toutes les paires ; condition égocentrée :  $X^2(4) = 77.63$ ,  $p = 5.51 \times 10^{-16}$ , pour toutes les paires).

En résumé pour les deux conditions, les résultats pour le couple brachioradial/rond-pronateur indiquent :

- Les index de co-activation de Kellis et d'Ervilha ne révèlent pas de variation du niveau de co-activation en fonction de l'ID, que ce soit avant ou après le pic de vitesse,
- Une augmentation de la co-activation sous l'effet de l'ID après le pic de vitesse concernant l'intégrale de la différence avant/après le pic de vitesse pour l'agoniste/antagoniste.

### 3.7.3. Relation entre la charge de travail et l'EMG avec l'augmentation de l'ID

Maintenant que l'évolution des différentes mesures de co-activation et l'activité des muscles avec l'augmentation de l'ID ont été étudiées pour les deux référentiels, nous allons étudier les relations entre les métriques EMG vis-à-vis du NASA-TLX.

#### 3.7.3.1. Relation entre le NASA-TLX et le couple Biceps brachial/Triceps brachial (BT)

Nous allons présenter les résultats concernant les relations entre les différentes mesures de co-activation et les scores du NASA-TLX.

Pour le référentiel géocentré, aucune corrélations sont retrouvées entre le score « physique » du NASA-TLX et les différents index. Des corrélations sont présentes pour les scores « global » et « mental » et les trois différents index de co-activation. Le score « mental » montre des corrélations plus fortes par rapport au score « global » et cela pour les trois index de co-activation étudiés voir Tableau 9.

Pour le référentiel égocentré, aucune corrélation a été trouvée entre les différents scores du NASA-TLX et l'index de co-activation de Kellis. Pour l'index de co-activation

d’Ervilha, seulement une faible corrélation négative avec le score « mental » est observée. Enfin, pour la différence des intégrales, il y a une forte corrélation négative entre cet index et les scores « global » et « mental » et une corrélation négative moyenne avec le score « physique ». Ce dernier résultat signifie que lorsque la co-activation augmente (i.e. la différence des intégrales diminue), le score « physique » diminue.

*Tableau 9 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps et les scores du NASA-TLX pour les deux référentiels.*

Variables pour BT	Position - Géocentré	Position - Egocentré
Kellis / Score global	$r=0.305, p=0.003$	$r=0.021, p=0.840$
Kellis / Score mental	$r=0.402, p=9.35^{-05}$	$r=0.236, p=0.025$
Kellis / Score physique	$r=0.0179, p=0.867$	$r=-0.335, p=0.001$
Ervilha / Score global	$r=0.344, p=0.009$	$r=0.04, p=0.707$
Ervilha / Score mental	$r=0.443, p=1.361^{-05}$	$r=0.313, p=0.0027$
Ervilha / Score physique	$r=0.03, p=0.0777$	$r=-0.372, p=0.00031$
Diff int / Score global	$r=-0.502, p=5.180^{-10}$	$r=-0.220, p=0.038$
Diff int / Score mental	$r=-0.700, p=2.139^{-14}$	$r=-0.631, p=3.17^{-11}$
Diff int / Score physique	$r=-0.078, p=0.466$	$r=0.413, p=5.763^{-05}$

Ces résultats montrent :

- Pour le référentiel géocentré : Des relations entre la co-activation du couple musculaire biceps brachial/triceps brachial et les scores « global » et « mental », avec des relations plus fortes avec le score « mental ».

- Pour le référentiel égocentré : La présence de relation entre le score « mental » et les 3 index, et des relations inverse avec le score « physique ». Ce résultat montre que le score « mental » et « physique » ont des relations avec les différents index de co-activations qui sont opposés.

### 3.7.3.2. Relation entre le NASA-TLX Couple Rond-pronateur/Brachioradial (BRRP)

Pour la condition géocentrée, seule des relations entre le score « mental » et les index d’Ervilha et la différence des intégrales est constatées. Il y a également la présence d’une relation entre le score « global » et la différence des intégrales (voir Tableau 10).

Pour la condition égocentrée, une corrélation négative est présente entre le score « mental » et l’index de Kellis, ce qui signifie que lorsque la co-activation augmente, le score « mental » diminue. Des corrélations négatives entre les scores « global » et « mental » avec la différence des intégrales sont observées. Ces résultats signifient que lorsque la co-activation augmente (i.e. la différence des intégrales diminue), les scores « global » et « mental » augmentent. Enfin, une corrélation positive entre le score « physique » et la différence des intégrales est constatée. Cette dernière relation signifie

que lorsque la co-activation augmente (i.e. la différence des intégrales diminue), le score « physique » diminue.

*Tableau 10 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple rond-pronateur/brachioradial et les scores du NASA-TLX » pour les deux référentiels.*

Variables pour BRRP	Position - Géocentré	Position - Egocentré
Kellis / Score global	$r=-0.038, p=0.716$	$r=-0.115, p=0.280$
Kellis / Score mental	$r=-0.202, p=0.056$	$r=-0.219, p=0.039$
Kellis / Score physique	$r=-0.055, p=0.60$	$r=0.154, p=0.148$
Ervilha / Score global	$r=-0.084, p=0.429$	$r=-0.09, p=0.356$
Ervilha / Score mental	$r=-0.242, p=0.021$	$r=-0.202, p=0.056$
Ervilha / Score physique	$r=-0.059, p=0.579$	$r=0.125, p=0.240$
Diff int / Score global	$r=-0.522, p=1.64^{-07}$	$r=-0.210, p=0.048$
Diff int / Score mental	$r=-0.648, p=6.59^{-12}$	$r=-0.583, p=2.60^{-09}$
Diff int / Score physique	$r=-0.043, p=0.684$	$r=0.338, p=0.0011$

Ces résultats montrent :

- Pour le référentiel géocentré : Des relations fortes entre le score « mental » et les index d'Ervilha et de la différence des intégrales.
- Pour le référentiel géocentré : La présence de relations entre la différence des intégrales et les trois scores du NASA-TLX. Une plus forte corrélation est visible avec le score « mental » tandis que la relation est opposée avec la corrélation entre cet indice et le score « physique ». Il y a également une relation entre l'index de Kellis et le score « mental » uniquement.

#### 4. Discussion chapitre 1

Pour résumer l'ensemble de nos résultats, nos hypothèses ont été en partie validées pour nos deux conditions. Notre première hypothèse semble être validée puisque nos résultats révèlent une augmentation de la charge cognitive avec l'augmentation de la difficulté de la tâche. Ceci est visible sur les métriques de charge de travail et sur les métriques liées au mouvement. Nous retrouvons :

- Une augmentation des scores du NASA-TLX
- Une dégradation de la performance,
- Une modification des patterns cinématiques,
- Une augmentation de la co-activation,
- Mais une diminution du DIMSS-PM.

Concernant la seconde hypothèse, des relations monotones entre la mesure subjective de la charge mentale du NASA-TLX avec des métriques du mouvement lors de l'augmentation de la difficulté de la tâche ont été retrouvées. Des relations inverses avec le DIMSS-PM ont été constatées. Pour la condition égocentrée, le DIMSS-PM et le score « physique » semble présenter une relation monotone.

Les résultats obtenus montrent que la dynamique du mouvement de pointage présente deux aspects l'un mécanique et l'autre cognitif. Certaines de nos métriques du mouvement sont dépendantes de la mécanique du mouvement et elles ne représentent pas le coût cognitif tandis que d'autres métriques sont dépendantes de l'aspect cognitif notamment de la charge cognitive. Les résultats relatifs aux deux métriques de charge de travail (i.e., dimensions mentale et physique du NASA-TLX et DIMSS-PM) montrent bien l'existence de ces deux aspects.

On a pu mettre en évidence que les scores du NASA-TLX augmentaient avec l'augmentation de la difficulté de la tâche avec une plus grande sensibilité pour le score « mental » par rapport aux scores « global » et « physique ». Toutefois pour la condition égocentrée, le score « global » présente une sensibilité uniquement pour l'ID5 révélant que soit une influence du score « mental », soit que plusieurs facteurs contenus dans cette moyenne sont impactés par l'augmentation de l'ID autre que le score « physique » ou « mental ». Dans ce référentiel, les participants n'ont pas les deux cibles visibles à chaque instant ce qui peut ajouter de l'incertitude et de l'imprévisibilité lors du pointage alors qu'en condition géocentrée ce n'est pas le cas. Nous suggérons que la dimension temporelle pourrait être la cause de la sensibilité à l'augmentation de la difficulté de la tâche pour le score « global » en égocentrée. Si cette hypothèse est vraie cela signifie que la sensibilité du score « global » peut être principalement dû à une autre dimension contenue dans le NASA-TLX ou le reflet de la dimension Exigence Mentale. Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait analyser de façon plus approfondi la pondération de l'ensemble des dimensions compris dans le questionnaire NASA-TLX. Pour les deux conditions (géocentrée et égocentrée), nous savons que la tâche de Fitts module la quantité d'information à traiter par l'ID et qu'elle impacte principalement le coût cognitif de la tâche. Plus il y a d'informations à traiter (ID élevé) plus le coût cognitif sera important. Nos résultats montrent que l'augmentation de l'ID impacte de façon plus importante le score « mental » du NASA-TLX. Nous avons pu valider l'impact de l'augmentation de l'ID sur le score « mental » i.e. plus la difficulté est importante plus la charge cognitive subjective ressentie par le participant est importante. La mesure du score « mental » du NASA-TLX semble sensible au coût cognitif dans notre étude pour les deux référentiels. Il existe en condition égocentrée un impact de l'ID sur le score « global » uniquement pour l'indice de difficulté élevé (ID5) ce qui suggère que soit la charge mentale est impacte le score « global » soit que d'autres facteurs viennent influencer la charge de travail lorsque le référentiel est égocentré. Parmi les 6 dimensions qui composent le score « global » nous avons l'exigence temporelle, la frustration, la performance, l'effort qui peuvent être impactés lorsque la quantité d'information à traiter est importante ou trop incertaine. Dans nos études, la mesure du score « mental » du NASA-TLX semble être le plus sensible au coût cognitif par rapport au score « global » qui lui semble plus sensible au référentiel appliqué.

A contrario, les valeurs du DIMSS-PM pour les deux référentiels diminuent avec l'augmentation de l'ID et présentent des corrélations négatives avec le score « mental »

du NASA-TLX. Cette divergence de sensibilité face à l'ID montre que la mesure du DIMSS-PM n'est pas sensible au coût cognitif associé à la réalisation de la tâche mais au caractère mécanique du mouvement à réaliser pour faire la tâche. Quand nous reprenons le calcul et le fonctionnement du DIMSS-PM, nous comprenons que dans notre étude elle mesure une quantité de mouvement. L'interprétation des valeurs du DIMSS-PM est définie par la fréquence et/ou l'amplitude du mouvement. Plus les valeurs du DIMSS-PM sont grandes plus elles correspondent à des mouvements de contrôle à haute fréquence ou de grande amplitude, ces valeurs élevées du DIMSS-PM sont définies comme une charge de travail élevée. Cette mesure ne vise pas à quantifier un phénomène d'utilisation des ressources cognitives liées aux variations de fréquence ou d'amplitude du mouvement mais uniquement au travail mécanique qui caractérise le mouvement. Dans notre étude, les centres des cibles à atteindre sont identiques même si la taille des cibles change pour définir les différentes difficultés. Pour un ID1, la fréquence du mouvement est beaucoup plus importante que pour un ID5. Ce phénomène peut expliquer que le DIMSS-PM ait un résultat inverse à celui obtenu par le questionnaire du NASA-TLX. [Jennings et collègues \(2005\)](#), ont voulu montrer dans leur travaux la pertinence du DIMSS-PM. Ils avaient calculé le DIMSS-PM à partir de données de vol. Leurs résultats ont montré qu'ils pouvaient valider cette méthode dans des conditions de contraintes (perturbations dans leur étude) proche de la tâche d'apportage pour laquelle elle a été conçue. Cette méthode semble avoir des limites pour mesurer la charge cognitive lorsque la charge de travail est déterminée par un changement de système de contrôle plutôt que déterminée par des perturbations. Pour la condition égocentrée, une relation monotone positive avec le score « physique » et le DIMSS-PM a été trouvée. Cette relation renforce le fait que la mesure du DIMSS-PM ne vise pas à quantifier un phénomène cognitif lié aux variations de fréquence ou d'amplitude du mouvement mais uniquement au travail mécanique du mouvement. Même si le référentiel égocentré ajoute de l'incertitude lors de l'atteinte de la cible suivante, la fréquence du mouvement reste plus importante pour des IDs faibles par rapport à des IDs élevés. Cette mesure telle qu'elle est calculée dans sa forme originelle ne semble pas adapter à notre tâche et elle ne semble pas sensible à la charge cognitive.

Lorsque nous analysons nos résultats des métriques de performances et cinématiques nous constatons l'impact lié au traitement de l'information sur l'augmentation de la charge cognitive inhérente à la réalisation de la tâche. Nous avons conclu que la performance diminuait avec l'augmentation de la difficulté de la tâche tant au niveau du nombre de portes validées que de la performance du temps de mouvement. Cette diminution de la performance montre la sensibilité des métriques de performance et de cinématique vis-à-vis du coût cognitif pour les deux référentiels. Nous avons pu constater l'influence de l'ID avec une modification de la linéarité du mouvement du pattern cinématique. Nous avons un changement de mode de contrôle lorsque les participants passent d'un ID facile vers un ID difficile, qui se caractérise par un décalage de la position du pic de vitesse qui arrive plus tôt dans le mouvement et ce pour les deux référentiels. Nous retrouvons les mêmes modifications que dans la littérature. [Mottet et Boostma \(1999\)](#) avaient démontré que lorsque le niveau de précision de la tâche était élevé, un changement de profil cinématique s'opère en basculant dans un mode de contrôle non-linéaire avec un changement de localisation du pic de vitesse qui arrive plus tôt dans le mouvement (i.e. phase d'accélération plus courte et un allongement de la phase de décélération). Cette modulation des patterns cinématiques permet la caractérisation d'un état stable auto-entretenu du mouvement passant d'un profil en cycle limite vers un profil en point fixe (visible sur le portrait de phase). Cet état stable en cycle limite est caractérisé

par une symétrie entre les deux demi-phases du mouvement réciproque, avec un pic de vitesse se situant au centre du mouvement, synonyme de stabilité et de fluidité du mouvement. Pour le profil en point fixe, ils ont constaté un décalage du pic de vitesse plus tôt durant la phase d'accélération et une décélération plus importante avec l'augmentation de l'ID, modifiant le pattern cinématique du mouvement. Le comportement de ce profil a été étudié par [Huys et collègues \(2010\)](#) qui ont montré l'apparition de deux mouvements discrets consécutifs séparés par deux points de rebroussement. Ces études ont déterminé que le comportement du mouvement de pointage était défini par un changement de dynamique avec l'augmentation de la difficulté de la tâche. Le système neuro-musculosquelettique (SNM) s'auto-organise sous l'effet des contraintes de la tâche en s'organisant entre deux modes de contrôle pour répondre au niveau de contraintes. Dans notre cas, nous pouvons constater une modulation des patterns cinématiques avec les portraits de phase. Nous retrouvons le basculement de mode de contrôle en cycle limite vers un mode de contrôle en point fixe avec l'augmentation de l'ID. Les localisations des pics de vitesses et les durées de la phase d'accélération suggèrent le changement de mode de contrôle. Cette nouvelle organisation cinématique (lorsque la difficulté de la tâche augmente) semblerait témoigner du basculement d'un mouvement continu vers la concaténation de mouvements de pointages discrets. La tâche réciproque qui est caractérisée par une dynamique continue du mouvement va basculer vers une dynamique discrète, conséquence de l'augmentation d'exigence informationnelle de la tâche (i.e. augmentation de l'ID). Nos résultats montrent une modification de la stratégie motrice avec l'augmentation de la difficulté de la tâche au travers des portraits de phases, de la localisation du pic de vitesse et du temps de mouvement.

En référentiel égocentree, nous observons visuellement que la performance de la tâche semble moins dégradée qu'en géocentree ce qui serait en accord avec la littérature. Des études ([Cho et al, 2017](#) ; [Lin et al, 2017](#)) avaient montré que dans un référentiel égocentrique la performance de navigation des pilotes était meilleure au référentiel géocentrique. Cependant, nos études ne permettent pas de comparer les deux référentiels entre eux, nous ne pouvons pas affirmer cela statistiquement. Des études de comparaisons entre les deux référentiels pourrait permettre de mieux approfondir les relations trouvées respectivement dans chaque référentiel durant ces expériences.

La performance (nombre de portes validées) de la tâche diminue qu'entre les IDs et l'ID5. Ceci indique que dans un référentiel égocentree la performance de la tâche est impactée uniquement par des IDs élevés i.e. de fort niveau de traitement informationnel.

On peut constater que les métriques de cinématique et de performance du mouvement sont sensibles aux variations de la quantité d'information à traiter et par conséquent au coût cognitif induit par ce traitement d'information. Les relations entre le score « mental » du NASA-TLX / TM et score « mental » / la position du pic de vitesse, montrent des corrélations positives ce qui suggère que les métriques cinématiques sont dépendantes du niveau d'exigence informationnelle de notre tâche et notamment qu'elles sont sensibles au coût cognitif pour les deux référentiels. Ces mêmes mesures de TM et position du pic de vitesse ont des corrélations négatives avec le DIMSS-PM, ce qui signifie que plus le mouvement se modifie (i.e. plus le mouvement se discrétise et la performance se dégrade) plus le DIMSS-PM diminue. Ce résultat renforce l'idée que le DIMSS-PM ne semble pas sensible à la charge cognitive pour les deux référentiels.

En résumé pour le mode de contrôle en position et dans les deux référentiels, le score « mental » du NASA-TLX, les mesures de performances et de cinématique semblent dépendantes la charge cognitive qu'implique l'exécution de notre tâche. La mesure du DIMSS-PM semble dépendante du caractère mécanique de notre tâche sans être liée à des mécanismes cognitifs. La sensibilité de nos métriques semble robuste puisqu'elles présentent pour la cinématique et la performance du mouvement des relations avec le score « mental » du NASA-TLX pour les deux référentiels.

Ce chapitre nous a permis au travers des analyses EMG de montrer l'importance d'étudier à différents niveaux d'analyses la discrétisation du mouvement déterminée avec les métriques cinématiques. Nous avons déterminé pour les deux référentiels qu'il y avait une sensibilité de la co-activation principalement pour le couple biceps brachial/triceps brachial pour les différents index de co-activation (Kellis, Ervilha et l'intégrale des différences agoniste-antagoniste) à la variation de la quantité d'information à traiter. Pour les deux référentiels, nous avons caractérisé une sensibilité de l'ensemble des index de co-activation avec le score « mental ».

Ces résultats suggèrent que le système neuro-musculosquelettique (SNM) s'organise pour modifier le mouvement afin de répondre aux contraintes de la tâche au niveau de la cinématique du mouvement et au niveau musculaire. Le SNM semble mettre en place une stratégie de co-activation musculaire afin de stabiliser le mouvement. Les travaux de [Gribble et collègues \(2003\)](#) ont mis en évidence la relation entre co-contraction et précision pour des mouvements discrets. Ce résultat serait en accord avec la littérature qui démontre que plus la cible était petite plus les co-contractions augmentaient ce qui suggère que malgré le coût énergétique des co-contractions, ce type de stratégie permet d'augmenter la raideur articulaire de l'effecteur et, par voie de conséquence, la précision du mouvement. Des travaux de [Berret et collègues \(2008, 2011\)](#) ont étudié le critère de co-activation. Ce critère de co-activation permet d'avoir une représentation de la stratégie mise en place par le SNC pour adapter l'impédance musculaire lors du mouvement. Sous contraintes de précision, la variabilité du rendement de l'acte moteur serait liée à une co-contraction musculaire accrue ainsi qu'un surplus de bruit moteur.

Nous obtenons des résultats différents pour la co-activation pour le couple Brachioradial/Rond-pronateur. En référentiel géocentré, nous avons une sensibilité pour le score « mental » et la différence des intégrales alors qu'une relation inverse avec l'index d'Ervilha a été trouvée. En égocentré, nous constatons également une relation inverse entre l'index de Kellis et le score « mental » alors que nous avons une sensibilité au score « mental » pour la différence des intégrales. Ces résultats entre les différents index et les scores peuvent être la cause de plusieurs éléments que nous allons détailler. Dans nos méthodes d'analyses, nous n'avons pas pris en compte le délai électromécanique des muscles ce qui peut induire des modulations sur nos calculs d'activation musculaire et donc de co-activation. En effet, la vitesse des mouvements varie en fonction des différents ID ce qui peut induire des délais différents entre l'activation musculaire et la réalisation du mouvement. Nous avons pris en compte de façon simplifiée l'anatomie et les caractéristiques des muscles i.e. que nous avons négligé certaines caractéristiques musculaires et biomécaniques des muscles. Si nous prenons l'exemple du muscle du triceps, il joue un rôle à la fois pour l'articulation de l'épaule (rétropulsion de l'épaule) et pour l'articulation du coude (extension du coude), dans nos analyses nous ne prenons pas en compte la totalité de son rôle dans la chaîne cinématique ni l'impact posturale de notre

étude sur son activation. D'autres effets sont aussi possibles, l'avant-bras comprend de nombreux muscles proches les uns des autres qui accentuent la possibilité de cross-talk par rapport au couple Biceps/Triceps., ce qui peut suggérer que la modulation de l'impédance musculaire entre les deux couples musculaires est impactée différemment durant notre tâche. Or, pour le référentiel égocentré, nous obtenons cette relation pour ce couple uniquement entre le score « mental » et l'intégrale des différences. Ce couple semble mettre en jeu une stratégie de co-activation différente par rapport au couple biceps/triceps et ceux pour les deux référentiels. Ces résultats nous amènent à penser que les deux couples musculaires sont impactés différemment durant notre tâche selon le référentiel dans lequel nous effectuons la tâche. Majoritairement, le couple Biceps/triceps semble plus impacté par l'augmentation de l'ID avec des variations de co-activation plus importante.

L'ensemble de ces résultats montre que l'augmentation de la charge cognitive implique une discrétisation du mouvement caractérisée par les différentes stratégies choisies par le SNM à différents niveaux du système. Pour obtenir un mouvement fluide, le SNM va inhiber certaines stratégies pour répondre aux contraintes de la tâche (exemples : moduler l'activité du muscle antagoniste, les bifurcations de pattern cinématique).

Ce premier chapitre a permis de discuter les résultats des expériences faite en mode de contrôle en position pour les deux référentiels (géocentré et égocentré) pour un mode de contrôle en position. Il a permis de mettre en lumière que la dynamique du mouvement implique une partie cognitive et une partie mécanique. Certaines mesures existantes de la charge de travail évaluent l'aspect cognitif et d'autres mesures l'aspect mécanique de la dynamique du mouvement. Le score « mental » du NASA-TLX semble évaluer le coût cognitif. Or, la mesure classique (i.e. score « global ») et le score « physique » semblent soit tenir compte de trop de dimensions pour refléter uniquement la charge cognitive, soit ne pas tenir compte de l'aspect cognitif mais seulement d'un autre facteur parmi les autres dimensions. Dans la même idée, la mesure du DIMSS-PM semble montrer une évaluation de la partie mécanique de la dynamique du mouvement et il ne semble pas représentatif de l'évaluation de la partie cognitive. Certaines métriques (cinématiques, performances, EMG) liées au mouvement sont impactées par la quantité d'informations à traiter pour réaliser la tâche (i.e. ID). Elles sont plus sensibles à l'aspect cognitif du mouvement notamment au coût cognitif (relation entre le score « mental » et les différentes métriques). Les métriques de performances et de cinématiques présentent une sensibilité à l'ID en quantifiant le coût cognitif. Les métriques EMG mettent en évidence la relation entre les stratégies mises en jeu par le SNM lors de la discrétisation de la tâche en réponse à l'augmentation des contraintes de la tâche. Pour les deux référentiels, nous avons observé l'effet de la difficulté de la tâche sur nos métriques ainsi que la relation entre nos métriques et de la charge cognitive au travers de mesures existantes.

Maintenant, nous allons voir si l'expertise des participants va induire des modifications de l'effet de la difficulté sur nos différentes métriques et si leurs relations à la charge cognitive sont impactées.

## **CHAPITRE 2 : Etude de l'effet de l'expertise (pilote vs civil) sur les relations entre les métriques de charge de travail et les métriques de caractérisation des coordinations motrices pour le contrôle en position**

Le chapitre précédent a montré l'effet de la difficulté sur les différentes mesures (cinématique, EMG, charge de travail) et ils ont permis de déterminer la nature des relations entre ces mesures et le coût cognitif pour deux référentiels (géocentré et égocentré) au travers du mode de contrôle en position.

Maintenant, nous allons étudier l'effet d'expertise sur ces relations. L'expertise est connue pour favoriser la performance et améliorer l'efficacité du traitement de l'information et par conséquent diminuer la charge cognitive pour réaliser une tâche.

L'objectif de ce troisième chapitre consiste à étudier les différences entre les pilotes et les civils concernant la nature des relations entre les mesures de charges de travail (questionnaire NASA-TX et DIMSS-PM) et les métriques relatives aux coordinations motrices (i.e., performance, cinématiques et électromyographiques) dans les deux référentiels (géocentré et égocentré).

Les mêmes hypothèses que dans le chapitre précédent ont été analysé afin d'étudier la robustesse de nos métriques entre les pilotes et les civils. Par conséquent, nous avons comparé (1) l'effet de l'augmentation des contraintes de la tâche (i.e. ID) sur les mesures de performance, du mouvement (cinématique/EMG) et de la charge de travail (questionnaire NASA-TLX et DIMSS-PM). Puis, (2) on a comparé l'évolution de ces variables en fonction du niveau d'expertise. Enfin, on a observé (3) les relations entre les mesures de charge cognitive et les métriques du mouvement (cinématiques, électromyographiques et de performance) ont été observées pour établir leur sensibilité à la difficulté de la tâche pour chaque groupe de niveau d'expertise.

### **1. Matériel et méthodes**

#### **1.1. Participants**

Pour les expériences 1 et 2 nous avons recruté 22 participant(e)s droitier(e)s dont 11 pilotes et 11 civils avec un âge moyen de 29.72 ans (sd : 4.80 ans) comprenant 5 femmes et 17 hommes.

#### **1.2. Protocole**

Dans ces deux expérimentations 1 et 2, les participants réalisaient une tâche de pointage réciproque entre deux cibles comme décrit dans la partie Méthodologie générale et dans le chapitre 1. Les participants contrôlaient le curseur en position (i.e., une position

du manche correspond à une position du curseur dans l'espace virtuel de simulation) dans les deux référentiels (voir Figure 32).

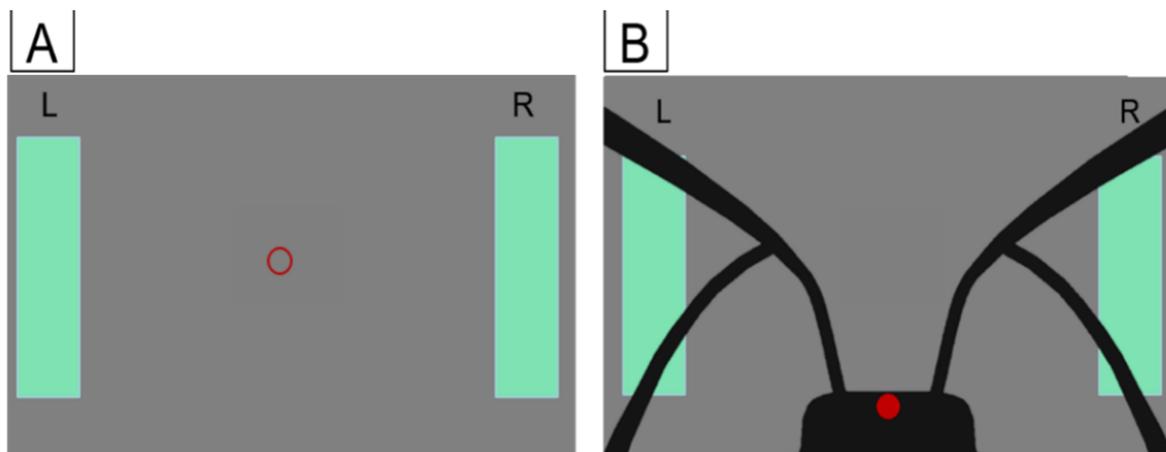


Figure 32 : Représente le visuel des participants en référentiel géocentré (A) et en référentiel égocentré (B).

### 1.3. Métriques et analyses

Pour l'analyse du niveau d'expertise, les variables manipulées étaient la difficulté de la tâche (i.e. ID allant de 1 étant le plus facile et 5 le plus difficile) et le niveau d'expertise (i.e. pilote et civil). Les variables dépendantes recueillies sont listées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Tableau des variables dépendantes de les expériences n° 1 et 2 suivis d'un tableau des variables dépendantes par espace d'analyse.

Catégorie de variables	Nom de la variable dépendante
Cinématique	Temps de mouvement (TM) Position du pic de vitesse (PV) DIMSS-PM Portrait de phase
Electromyographique	Activité musculaire par muscle Index de co-activation de Kellis Index de co-activation d'Ervilha Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste
Questionnaire NASA-TLX	Score global Score mental Score physique
Espace de la tâche	Espace effecteur
Nombre de cibles validées	Temps de mouvement (TM)
Temps de mouvement (TM)	Position du pic de vitesse (PV)
Position du pic de vitesse (PV)	DIMSS-PM
Portrait de phase	Activité musculaire par muscle
	Index de co-activation de Kellis
	Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste

Toutes nos variables ont été traitées et analysées comme décrit dans la partie Méthodologie générale. Les mêmes variables ont été traitées pour les deux référentiels.

## 2. Hypothèses : expertise

Pour ce chapitre nous faisons l'hypothèse qu'on a la présence d'un effet du niveau d'expertise qui s'apparente à une différence pilote versus civil pour l'ensemble de nos hypothèses pour les deux référentiels.

Pour rappel, plusieurs hypothèses qui ont été élaborées :

Notre première hypothèse postulait qu'une augmentation de l'ID s'accompagnait d'une augmentation du coût cognitif visible à la fois sur les métriques de charge de travail ainsi que sur les métriques liées au mouvement. Concernant l'impact de l'augmentation de l'ID sur nos métriques, les sous-hypothèses étaient les suivantes :

- (1) Augmentation des scores du NASA-TLX de façon spécifique au score mental, plus particulièrement pour les civils par rapport aux pilotes.
- (2) Augmentation du DIMSS-PM, plus importante pour les civils par rapport aux pilotes.
- (3) Dégradation de la performance (tâche et cinématique), plus importante pour les civils par rapport aux pilotes.
- (4) Modification de la stratégie motrice (cinématique), différentes entre les civils et les pilotes.
- (5) Augmentation de la co-activation (EMG), supérieur pour les civils par rapport aux pilotes.

Notre seconde hypothèse postulait qu'une relation existe entre la mesure subjective de la charge mentale et nos différentes métriques du mouvement pour chaque groupe d'expertise.

## 3. Résultats des expériences 1 et 2 : expertise

### 3.1. Résultats sur la charge de travail : questionnaire NASA-TLX

Dans ce chapitre, nous faisons l'hypothèse que la charge de travail telle que quantifiée par le questionnaire NASA TLX augmentait avec le niveau de difficulté de la tâche dans les deux référentiels pour les deux catégories de participants avec une charge de travail inférieure pour les pilotes par rapport aux civils.

Afin de tester cette hypothèse, l'évolution des scores obtenus sur le questionnaire NASA TLX a été obtenue en fonction du niveau d'ID. Nous nous sommes intéressés au score « global » obtenu (moyenne des 6 critères du questionnaire) ainsi qu'aux critères

Exigence Mentale et Exigence Physique pris séparément sur nos deux catégories de participants.

Tout d'abord, un effet significatif de l'ID a été observé sur les trois types de scores puis on a comparé les deux groupes pour chacun des scores, (voir Figure 33).

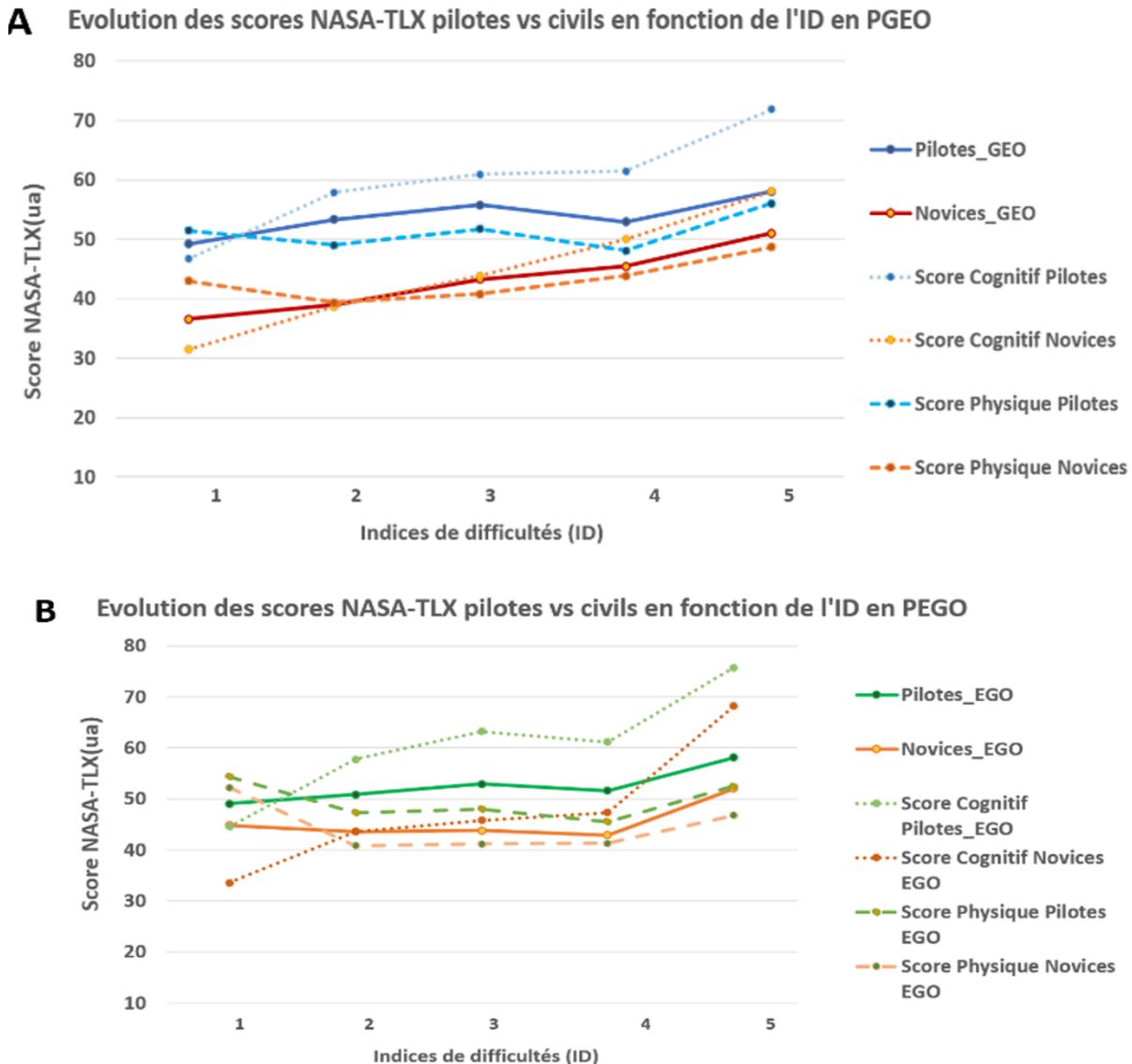


Figure 33 : Graphiques des différents scores du NASA-TLX pour les pilotes et les civils en mode de contrôle en position en référentiel géocentré noté PGEO (A) et en référentiel égocentré noté PEGO(B).

Pour le **référentiel géocentré**, le score « global » augmente avec la difficulté de la tâche pour les civils ( $F(4,36)=11.029, p=0.001$ , pour les paires ID1-ID5, ID2-ID5 et ID3-ID5), et pour les pilotes ( $F(4,40)=6.66, p=0.002$ , pour aucune paire montrant un faible effet principal).

Pour les comparaisons des deux groupes, une tendance du niveau d'expertise sur le score « global » a été observée (estimate std.= 12.65, error= 4.831, t.value = 7.562,  $p=1.96^{-1}$ ). Il n'y a pas de différences du score « global » entre l'ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-

ID4 ( $p>0.5$ ) mais une différence a été observée pour l'ID5 (« ID5 »), estimate std. = 14.45, error = 6.83 t.value= 2.115,  $p=0,036$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « global »( $p>.05$ ).

Pour le score « mental » nous retrouvons une augmentation significative en fonction de l'ID pour les civils ( $F(4,36)=22.388, p=0.000121$ , pour les paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID4, ID2-ID5, ID4-ID5) et pour les pilotes ( $F(4,40)=12.872, p=0.000935$ , pour les paires ID1-ID3, ID1-ID5, ID2-ID5, ID4-ID5).

Les résultats du modèle mixte pour les comparaisons des deux groupes montrent une tendance du niveau d'expertise sur le score « mental » (estimate std.= 31.47, error=6.222, t.value=5.059,  $p=1.92^{-06}$ ) . Il n'y a pas de différences du score « mental » entre l'ID1-ID2, ID1-ID3 ( $p>0.5$ ) mais une différence a été observée pour l'ID4 (« ID4 », estimate std. =18,52, error=8,79, t.value =2,105,  $p=0,037$ ) et l'ID5 (« ID5 »), estimate std. = 26,59, error = 8,79, t.value= 3,022,  $p=0,003$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « mental »( $p>.05$ ).

Pour le score « physique », nous ne constatons aucune différence entre les difficultés de la tâche pour les civils ( $F(4,36)=2.039, p=0.166$ ) et les pilotes ( $F(4,40)=2.875, p=0.085$ ).

Les comparaisons des deux groupes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur le score « physique » (estimate std.= 8.52, error=9.66, t.value=0.88,  $p=0.380$ ) . Il n'y a pas de différences du score « physique » et tous les IDs ( $p>0.5$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « physique »( $p>.05$ ).

Pour le référentiel égocentré, le score « global » augmente avec l'ID uniquement pour la paire ID4-ID5 pour les civils ( $F(4,36)=4.538, p=0.019$ ) et pour les pilotes ( $F(4,40)=6.889, p=0.023$ , pour aucune paire montrant le faible effet principal).

Pour les comparaisons des deux groupes, aucune tendance du niveau d'expertise sur le score « global » a été observée (estimate std.= 4.205, error=6.481, t.value = 0.649,  $p=0.518$ ) . Il n'y a pas de différences du score « global » pour l'ensemble des IDs ( $p>0.5$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « global »( $p>.05$ ).

Pour le score « mental », nous retrouvons une augmentation en fonction de l'ID pour une grande parties des paires ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4, ID1-ID5, ID2-ID5, ID3-ID5, ID4-ID5 pour les civils ( $F(4,36)=21.942, p=1.21^{-5}$ ) et pour les pilotes uniquement pour la paire ID4-ID5 ( $X^2(4)=23.66, p=9.31^{-05}$ ).

Les résultats du modèle mixte pour les comparaisons des deux groupes montrent une tendance du niveau d'expertise sur le score « mental » (estimate std.= 11.023, error=9.142, t.value=1.206,  $p=0.230$ ) . Il n'y a pas de différences du score « mental » entre l'ID1-ID2, ID1-ID3, ID1-ID4 ( $p>0.5$ ) mais une différence a été observée pour l'ID5 (« ID5 »), estimate std. =34.659, error = 9.142, t.value= 3.791,  $p=0,0002$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « mental »( $p>.05$ ).

Nous n'avons pas de différence entre les ID pour le score « physique » pour les civils ( $F(4,36)=2.011, p=0.184$ ) et les pilotes ( $F(4,40)=2.243, p=0.009$ ).

Pour les comparaisons des deux groupes, il n'y a pas de tendance du niveau d'expertise sur le score « physique » (estimate std.= 2.159, error=10.135, t .value = 0.213,  $p=0.832$ ) . Il n'y a pas de différences du score « physique » pour l'ensemble des IDs ( $p>0.5$ ). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le score « physique »( $p>.05$ ).

Ces premiers résultats montrent (pour les deux référentiels), l'absence d'interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur les différents scores du NASA-TLX.

En résumé, les résultats montrent une augmentation des scores « global » et « mental » du NASA-TLX pour les civils et les pilotes avec l'augmentation de l'ID et cette influence est majoritairement observée sur le score « mental ». Nous observons une augmentation de la charge de travail avec l'augmentation de l'ID pour les deux groupes.

Le score « mental » semble sensible à l'augmentation de la charge cognitive car il présente des différences significativement fortes entre l'ID1 et toutes les autres difficultés pour les pilotes et les civils en référentiel géocentré et pour les civils en condition égocentrée. Nous observons visuellement dans le référentiel égocentré que les pilotes semblent moins sensibles au coût cognitif. Ceci montre que les pilotes sont moins sensibles à la difficulté de la tâche dans ce référentiel.

Lorsque l'on considère la dimension physique du questionnaire, cet effet de la difficulté semble ne pas exister pour les civils et les pilotes pour les deux référentiels. Ceci vient appuyer le fait que la manipulation de l'indice de difficulté proposée ici, impacte de manière plus importante la dimension cognitive de la charge de travail que les autres dimension (notamment, la dimension physique). Le score « global » dans le référentiel géocentré est impacté pour les civils et non pour les pilotes. La manipulation de l'ID dans le contexte égocentré impacte le score « global » principalement par rapport à la difficulté la plus élevée (ID5), ce qui indique que l'un des facteurs pris en compte dans ce score est sensible à l'ID5 pour les civils.

### 3.2. Résultats de la charge de travail : DIMSS-PM

Dans ces expériences, nous avons fait l'hypothèse que la charge de travail telle qu'elle est quantifiée par le DIMSS-PM augmente avec la difficulté de la tâche et de façon plus importante pour les civils.

Afin de tester cette hypothèse, l'évolution des scores du DIMSS-PM en fonction de l'ID a été explorée pour les deux référentiels et des comparaisons les civils et les pilotes ont été faites.

Nos résultats montrent une diminution significative pour les deux référentiels pour les civils et les pilotes séparément. (voir Tableau 12 et Figure 34).

Pour le référentiel géocentré, les résultats du modèle mixte montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur le DIMSS-PM (estimate std.=0.10, error=0.236, t.value=0.429, p=0.669) . Il y a des différences du DIMSS-PM entre l'ID1-ID2 (« ID2 », estimate std. =-1.11, error=0.236, t.value =-4.742, p=7.05<sup>-06</sup>), ID1-ID3 (« ID3 », estimate std. =-1.93, error=0.236, t.value =-8.185, p=9.10<sup>-13</sup>), ID1-ID4 (« ID4 », estimate std. =-2.55, error=0.236, t.value =-10.829, p=2<sup>-16</sup>) et ID1-ID5 (« ID5 », estimate std. = -3.05, error = 0.236, t.value= -12.929, p=2<sup>-16</sup>). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le DIMSS-PM (p>.05). Nous retrouvons les mêmes résultats pour le référentiel égocentré.

Ces résultats montrent (pour les deux référentiels), l'absence d'interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur le DIMSS-PM.

Tableau 12 : Tableau des résultats des test statistiques pour le DIMSSPM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.

Variable	Position- Géocentré	Position-Egocentré
DIMSS-PM pour les civils	$X^2(4)=36.24, p=2.58^{-07}$ , toutes les paires.	$X^2(4)=36.16, p=2.68^{-07}$ , 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5.
DIMSS-PM pour les pilotes	$F(4,40)=241.367, p=5.04^{-15}$ toutes les paires.	$X^2(4)=43.27, p=9.08^{-09}$ , toutes les paires.

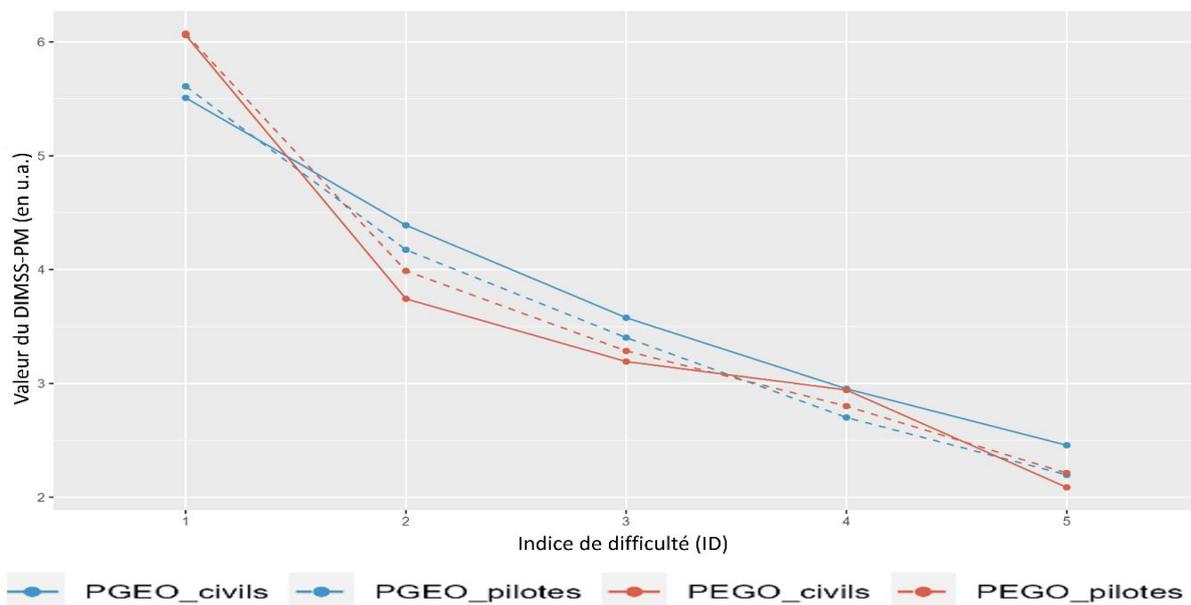


Figure 34 : Graphique des valeurs du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la tâche dans le référentiel géocentré et le référentiel égocentré pour les civils et les pilotes.

### 3.3. Stratégie motrice : performance de la tâche et performance de la cinématique du mouvement

Nous allons à présent considérer les métriques de performance (tâche et mouvement). L'hypothèse était que la performance se dégrade avec l'augmentation de l'ID et de façon moins importante pour les pilotes par rapport aux civils.

Concernant l'effet de l'ID sur la performance de la tâche, diminution significative a été observée de la performance (i.e. nombre de cibles validées) avec l'augmentation de l'ID dans les deux référentiels pour les deux catégories de participants. Cependant, nous constatons pour les civils et les pilotes un effet de la difficulté de la tâche principalement sur les IDs élevés (Voir Figure 35 et Tableau 13)

Pour le référentiel géocentré, les comparaisons des deux groupes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur le nombre de portes validées (estimate std.=-0.60, error=0.63, t.value-0.951, p=0.343). Il n'y a pas de différences du nombre de portes entre l'ID1-ID2(p>0.5) mais il y a des différences pour l'ID3 (« ID3 », estimate std. =-2.15, error=0.633, t.value =-3.41, p=0.0009), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std. =-4.15, error=0.633, t.value =-6.56, p=2.3^-09) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. = -6.06, error = 0.63, t.value= -9.58, p=8.09^-16). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le nombre de portes validées (p>.05).

Pour le référentiel égo centré, le modèle mixte montre aucune tendance du niveau d'expertise sur le nombre de portes validées (estimate std=0.39, error=0.66, t.value=0.596, p=0.553). Il n'y a pas de différences du nombre de portes entre l'ID1-ID2, l'ID1-ID3, ID1-ID4 (p>0.5) mais il y a des différences pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. = -4.193, error = 0.66, t.value= -6.28, p=8.73^-09). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le nombre de portes validées (p>.05).

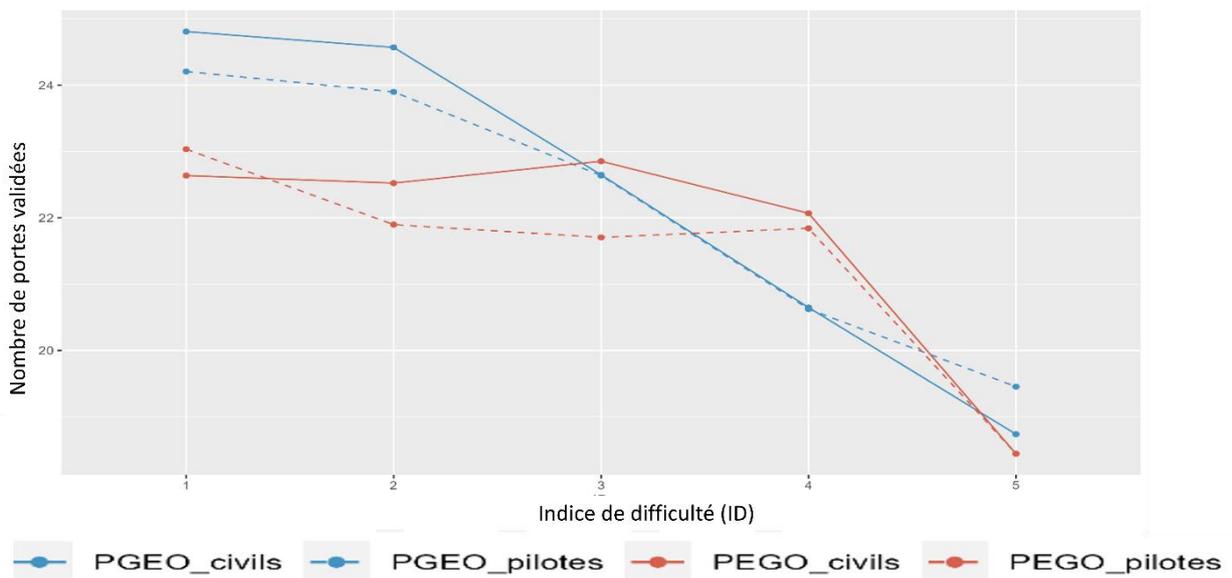


Figure 35 : Graphique du nombre de portes validées en fonction de la difficulté de la tâche dans les deux référentiels pour les civils et les pilotes.

Tableau 13 : Tableau des résultats des test statistiques pour le nombre de portes validées pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Nombres de portes validées Civils	$\chi^2(4)=30.8, p=3.36^{-06}, 1/5, 3/5.$	$F(4,36)=24.507, p=3.27^{-07}, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5.$
Nombres de portes validées Pilotes	$F(4,40)=25.616, p=2.19^{-07}, 1/4, 1/5, 2/4, 3/4, 3/5.$	$F(4,40)=13.637, p=7.14^{-06}, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5.$

Concernant le temps de mouvement (TM), une augmentation significative du TM a été constatée lors de l'augmentation de l'ID avec des différences significatives entre toutes les paires d'ID pour les civils et les pilotes. La performance du mouvement diminue avec l'indice de difficulté (i.e., les participants mettent plus de temps à effectuer la tâche) dans les deux référentiels pour les civils et les pilotes (voir Tableau 14 et Figure 36).

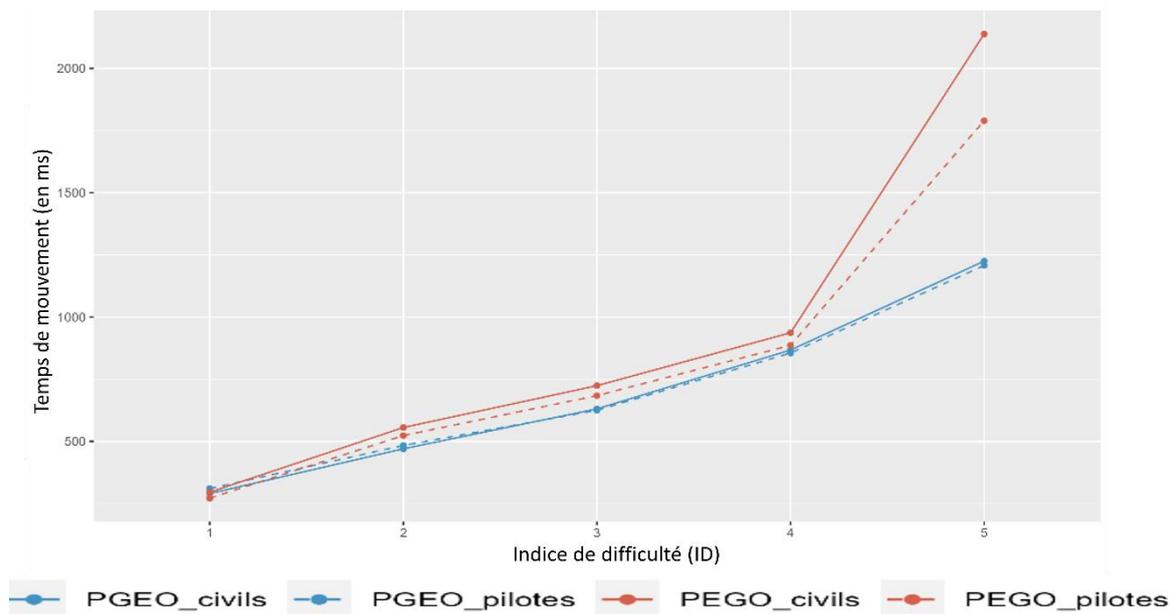


Figure 36 : Graphique du TM en fonction de la difficulté de la tâche dans les deux référentiels pour les civils et les pilotes.

En référentiel géocentré, les comparaisons civils-pilotes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur le TM (estimate std.=-20.09, error=39.07, t.value=0.51, p=0.608) . Il y a des différences de valeur du TM pour l'ID2 (« ID2 », estimate std. =179.929, error=39.07, t.value =4.60, p=1.22<sup>-05</sup>), l'ID3 (« ID3 », estimate std. =340, error=39.07, t.value =8.716, p=6.41<sup>-14</sup>), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std.=577.11, error=39.07, t.value =14.77, p=2<sup>-16</sup>) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =934.60, error = 39.07, t.value= 23.92, p=2<sup>-16</sup>). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le TM (p>.05).

En référentiel égocentré, les comparaisons civils vs pilotes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur le TM (estimate std.=-24.091, error=105.23, t.value=-0.229, p=0.819) . Il y a des différences de valeur du TM pour l'ID2 (« ID2 », estimate std. =260.05, error=105.23, t.value =2.47, p=0.015), l'ID3 (« ID3 », estimate std. =428.28, error=105.23, t.value =4.07, p=9.41<sup>-05</sup>), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std.=641.07, error=105.23, t.value =6.09, p=2.09<sup>-08</sup>) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =1842.48, error = 105.23, t.value= 17.50, p=2<sup>-16</sup>). Ici, il y a un effet d'interaction uniquement entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'ID5 sur le TM (« CategoriePilote :ID5 », estimate std. =-324.55, error=148.82, t.value =-2.18, p=0.031).

*Tableau 14 : Tableau des résultats des test statistiques pour le TM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Temps de mouvement (TM) Civils	$F(4,36)=436.562, p=2.21^{-11},$ toutes les paires.	$F(4,36)=71.354, p=1.19^{-05},$ toutes les paires.
Temps de mouvement (TM) Pilotes	$F(4,40)=570,486, p=1.45^{-13}$ toutes les paires.	$F(4,40)=235.868, p=5.27^{-10}$ toutes les paires.

Ces résultats semblent montrer que :

- La performance de la tâche diminue avec l'augmentation de l'ID pour les deux catégories de participants dans les deux référentiels.

-La performance de la cinématique du mouvement diminue avec l'augmentation de l'ID pour les deux catégories de participants dans les deux référentiels.

-L'absence d'interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur la performance (tâche et cinématique du mouvement) pour le référentiel géocentré.

-Une interaction entre l'ID et le niveau d'expertise qui indique un effet différent du niveau d'expertise pour l'ID5.

### 3.4. Stratégie motrice : cinématique du mouvement

Nous faisons l'hypothèse que la cinématique du mouvement se dégrade avec l'augmentation de l'ID i.e. des modifications cinématiques. Nous nous attendons à une dégradation moins importante chez les pilotes par rapport aux civils.

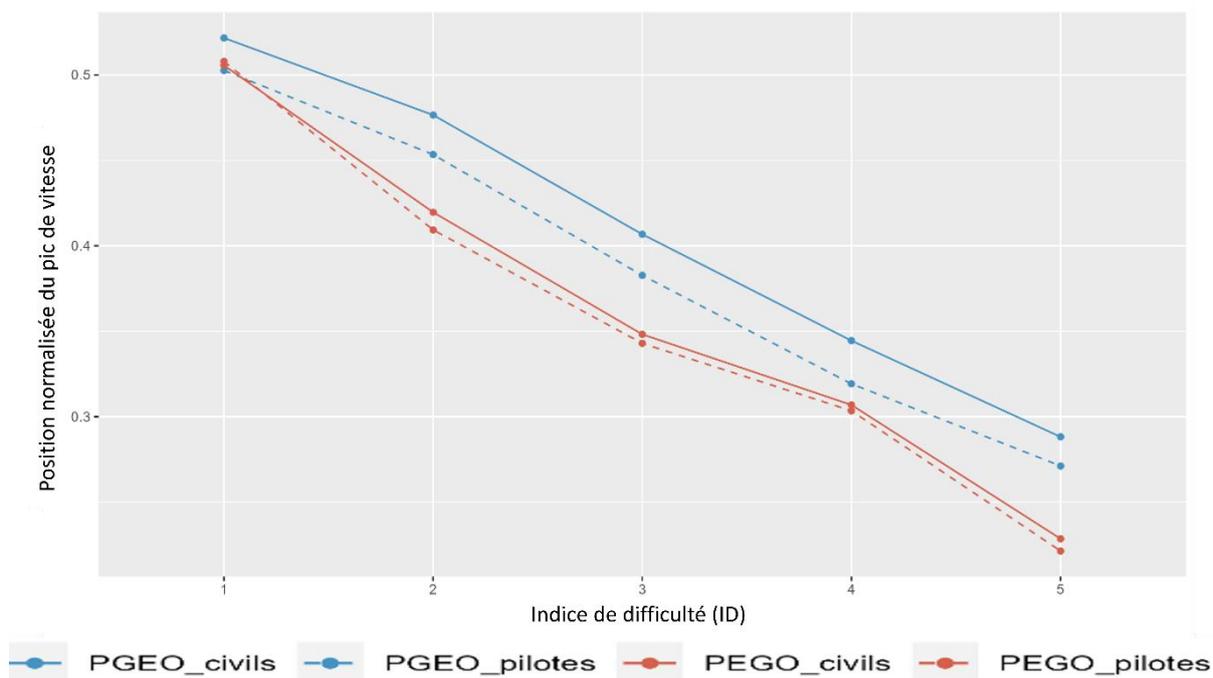
Nous allons présenter les résultats concernant l'effet de l'ID sur les différentes mesures de la cinématique du mouvement (localisation du pic de vitesse).

Une diminution de la position du pic de vitesse i.e. un pic de vitesse qui arrive plus tôt avec l'augmentation de l'ID pour les deux catégories de participants dans les deux référentiels (voir Tableau 15 et Figure 37).

En référentiel géocentré, les comparaisons des civils avec les pilotes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur la position du pic de vitesse (estimate std.=-0.01, error=0.013, t.value=-1.43, p=0.155) . Il y a des différences de position du pic de vitesse pour l'ID2 (« ID2 », estimate std. =-0.045, error=0.013, t.value =-3.400, p=0.0009), l'ID3 (« ID3 », estimate std. =-0.11, error=0.013, t.value =-8.66, p=8.43<sup>-14</sup>), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std.=-0.177, error=0.013, t.value =-13.35, p=2<sup>-16</sup>) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =-0.233, error = 0.013, t.value= -17.59, p=2<sup>-16</sup>). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur la position du pic de vitesse (p>.05). Pour le référentiel égocentré, les mêmes résultats ont été retrouvés.

*Tableau 15 : Tableau des résultats des test statistiques pour le PV pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

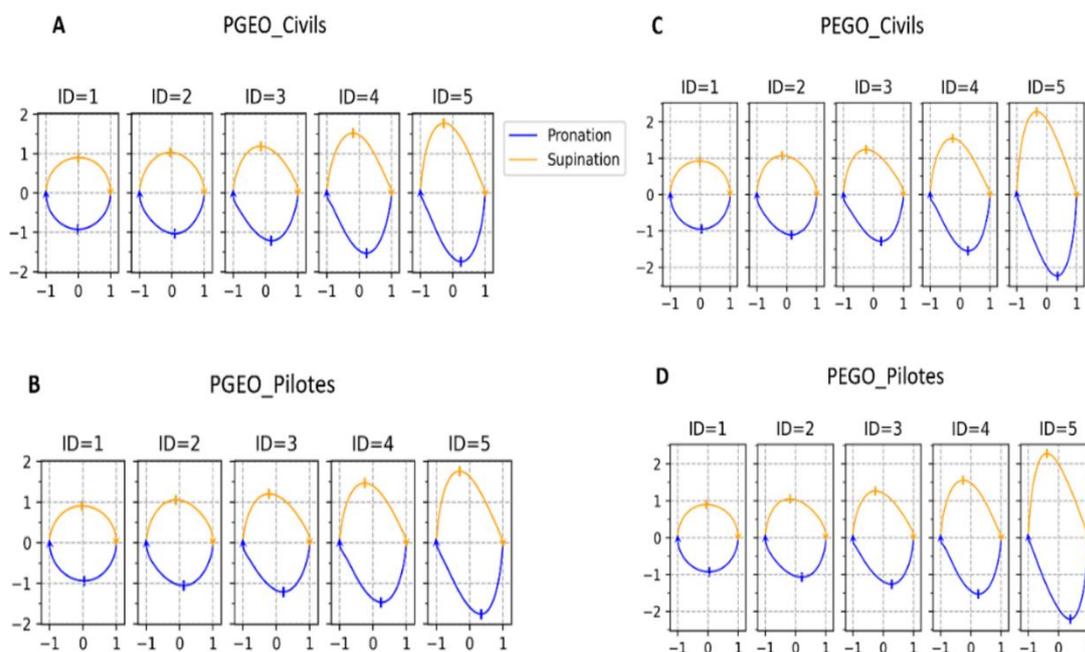
Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Position du pic de vitesse (PV) Civils	$F(4,36)=157.756, p=3.36^{-06}$ , toutes les paires sauf 1/2.	$F(4,36)=169.618, p=1.19^{-05}$ , toutes les paires.
Position du pic de vitesse (PV) Pilotes	$F(4,40)=338.755, p=9.15^{-18}$ , toutes les paires.	$X^2(4)=44, p=6.41^{-09}, W=1$ , toutes les paires.



*Figure 37 : Graphique du PV en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré et égocentré.*

De plus, les portraits de phases des civils et des pilotes montrent le décalage du pic de vitesse sur les deux portions du mouvement (pronation et supination) pour les deux référentiels. Une modification du pattern cinématique avec l'augmentation de l'ID a été observée pour les deux catégories de participants. Cette modification des patterns semble en accord avec les données cinématiques telles que la durée de la phase d'accélération, la position et la valeur du pic de vitesse et le temps de mouvement (voir Figure 38).

Ces résultats montrent des modifications de la cinématique du mouvement avec l'augmentation de l'ID. En effet, les stratégies motrices se modifient avec un pic de vitesse qui arrive plus tôt dans le mouvement, une durée de la phase d'accélération qui diminue et ce pour les deux types de mouvement (pronation et supination) concernant les deux catégories de participants. L'absence d'interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur la position du pic de vitesse.



*Figure 38 : Graphique des portraits de phase pour les civils et les pilotes pour le référentiel géocentré (noté PGEO) et égocentré (noté PEGO).*

Ce résultat suggère que les pilotes et les civils semblent avoir des stratégies cinématiques similaires lors de l'augmentation de l'ID.

### 3.4.1. Relation entre la charge de travail, la performance et la cinématique avec l'augmentation de l'ID

Nous avons vu (1) comment évoluent les deux mesures de charge de travail, les mesures de performances et les mesures de caractérisation des stratégies motrices en fonction de l'ID. Nous (2) avons analysés les différences entre les niveaux d'expertise pour ces variables. Maintenant, nous allons étudier la relation entre ces mesures dans un premier temps vis-à-vis du NASA-TLX puis dans un second temps vis-à-vis du DIMSS-PM pour chaque groupe.

#### 3.4.1.1. Relation NASA-TLX et la performance du mouvement

Nous avons étudié la relation entre les différents scores du NASA-TLX et le TM (performance cinématique) pour le groupe « civils » et le groupe « les pilotes ».

Pour les deux référentiels, une corrélation moyenne a été constatée pour le score « global » et une corrélation forte a été observée entre le score « mental » et le TM pour les deux niveaux d'expertise (i.e. civils et pilotes). Aucune corrélation entre le score « physique » et le TM n'a été trouvée pour les deux catégories de participants dans les deux référentiels (voir Tableau 16).

Ce résultat montre qu'il existe des relations entre les mêmes scores du questionnaire NASA-TLX et la performance pour les deux groupes de participants.

*Tableau 16 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le TM et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs TMcivils	$r= 0.621, p=5.19^{-06}.$	$r= 0.43 p=0.003.$
Score Mental vs TM civils	$r=0.755 , p=2.07^{-09}.$	$r= 0.77 , p=4.59^{-10}.$
Score Physique vs TM civils	$r=0.285 , p= 0.056.$	$r= -0.003 , p=0.97.$
Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs TM pilotes	$r=0.515 , p=00002.$	$r= 0.54 , p=0.0001.$
Score Mental vs TM pilotes	$r=0.714 , p=3.59^{-08}.$	$r=0.69 , p=1.50^{-07}.$
Score Physique vs TM pilotes	$r= 0.248 , p=0.069.$	$r=0.03 , p=0.83.$

### 3.4.1.2. Relation NASA-TLX et Cinématique du mouvement

Nous avons étudié la relation entre les différents scores du NASA-TLX et la position du pic de vitesse (cinématique) pour les deux catégories.

Une forte corrélation négative a été constatée entre la position du pic de vitesse et le score « mental » et aucune corrélation pour le score « physique » dans les deux référentiels pour nos deux catégories de participants. Pour le score « global » une corrélation moyenne a été trouvée pour toutes les conditions sauf pour les civils en référentiel égocentré (voir Tableau 17).

*Tableau 17 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le PV et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs PV civils	$r=-0.63 , p=2.32^{-06}.$	$r= -0.26 , p=0.07.$
Score Mental vs PV civils	$r= -0.74 , p=5.66^{-09}.$	$r= -0.70 , p=6.08^{-08}.$
Score Physique vs PV civils	$r=0.26 , p=0.082.$	$r=0.20 , p=0.16.$
Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs PV pilotes	$r= -0.46 , p=0.001.$	$r= -0.49 , p=0.0005.$
Score Mental vs PV pilotes	$r= -0.65 , p=1.03^{-06}.$	$r= -0.74 , p=5.53^{-09}.$
Score Physique vs PV pilotes	$r= -0.14 , p= 0.33.$	$r= 0.10 , p=0.48.$

Ces deux résultats montrent qu'il existe une relation entre les scores du NASA-TLX et la mesure de performance cinématique (TM) i.e. ces deux variables semblent avoir la même sensibilité à l'augmentation de l'ID. De plus, le score « mental » semble plus sensible à la manipulation de la quantité d'information à traiter (ID) pour les deux catégories de participants. La relation entre la performance cinématique et le NASA-TLX montre une corrélation positive entre le score « mental » du NASA-TLX et le TM.

Nous notons l'existence d'une relation entre le score « mental » du NASA- TLX et la position du pic de vitesse par une corrélation négative entre les deux. Cette corrélation négative signifie que lorsque le pic de vitesse diminue le score « mental » augmente, ce qui représente une position du pic de vitesse qui arrive plus tôt. Le décalage du pic de vitesse reflète une augmentation de la charge cognitive liée à l'augmentation de l'ID. Nous

retrouvons ce décalage du pic de vitesse sur les portraits de phase pour les deux catégories de participants. Concernant, le score « global » semble moins sensible à l'augmentation de la quantité d'information à traiter tandis que le score « physique » ne semble pas sensible à l'augmentation de la charge cognitive dans notre tâche. Nous retrouvons les mêmes résultats pour les civils et les pilotes.

### 3.4.2. Relation DIMSS-PM / Cinématique

Maintenant que nous avons déterminé les relations entre les scores du NASA-TLX et le TM puis la position du pic de vitesse pour les deux groupes, nous allons déterminer les relations avec le DIMSS-PM.

Une forte corrélation négative entre le DIMSS-PM et le TM a été remarquée, ce qui signifie que lorsque la performance se dégrade (i.e. TM augmente), le DIMSS-PM diminue suggérant une diminution de la charge cognitive pour les deux catégories de participants. (voir Tableau 18).

*Tableau 18 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le TM et le DIMSS-PM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
<i>DIMSS-PM vs TM civils</i>	<i><math>r = -0.87, p = 2.87 \times 10^{-15}</math></i>	<i><math>r = -0.70, p = 7.78 \times 10^{-8}</math></i>
<i>DIMSS-PM vs TM pilotes</i>	<i><math>r = -0.90, p = 6.85 \times 10^{-18}</math></i>	<i><math>r = -0.79, p = 4.63 \times 10^{-11}</math></i>

Une forte corrélation positive entre le DIMSS-PM et la position du pic de vitesse a été observée, ce qui signifie que lorsque le DIMSS-PM diminue la position du pic de vitesse arrive de plus en plus tard pour les civils et les pilotes. Cette dynamique n'est pas celle retrouvée dans le mouvement pour les deux groupes (voir Tableau 19).

*Tableau 19 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le PV et le DIMSS-PM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Vitesse -Géocentré	Vitesse - Egocentré
<i>DIMSS-PM vs PV civils</i>	<i><math>r = 0.89, p = 1.49 \times 10^{-16}</math></i>	<i><math>r = 0.89, p = 5.90 \times 10^{-17}</math></i>
<i>DIMSS-PM vs PV pilotes</i>	<i><math>r = 0.94, p = 2.38 \times 10^{-23}</math></i>	<i><math>r = 0.93, p = 3.58 \times 10^{-21}</math></i>

Ces deux résultats montrent que le DIMSS-PM ne semble pas évaluer la charge cognitive dans notre tâche mais la quantité de mouvement et ceux autant pour les civils et que pour les pilotes. Nous retrouvons des relations entre le DIMSS-PM et les critères cinématiques (TM et PV) pour les civils et pour les pilotes.

Une forte corrélation négative entre le DIMSS-PM et le score « mental » a été retrouvée ainsi qu'une corrélation moyenne entre le DIMSS-PM Médian et le score « global » dans les deux catégories d'expertise pour toutes les conditions sauf pour les civils en référentiels égocentré. Pour le score « physique », aucune corrélation n'a été observée sauf pour les civils en référentiel égocentré (voir Tableau 20).

*Tableau 20 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le DIMSS-PM et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs DIMSS-PM civils	$r = -0.59, p = 1.86 \times 10^{-5}$ .	$r = -0.07, p = 0.61$ .
Score Mental vs DIMSS-PM civils	$r = -0.73, p = 6.60 \times 10^{-9}$ .	$r = -0.62, p = 3.73 \times 10^{-6}$ .
Score Physique vs DIMSS-PM civils	$r = 0.16, p = 0.29$ .	$r = 0.40, p = 0.005$ .
Variables	Position -Géocentré	Position - Egocentré
Score Global vs DIMSS-PM pilotes	$r = -0.51, p = 0.0003$ .	$r = -0.43, p = 0.002$ .
Score Mental vs DIMSS-PM pilotes	$r = -0.70, p = 4.77 \times 10^{-8}$ .	$r = -0.72, p = 1.37 \times 10^{-8}$ .
Score Physique vs DIMSS-PM pilotes	$r = -0.10, p = 0.50$ .	$r = 0.27, p = 0.06$ .

En résumé, nos résultats montrent une diminution de la performance, une modification du pattern cinématique avec l'augmentation de l'ID pour les civils et pour les pilotes. Des relations existent entre le temps de mouvement et le score « mental » du NASA-TLX ainsi qu'entre la position du pic de vitesse et le score « mental » du NASA-TLX pour les deux catégories de participants. Par contre, nous avons des relations opposées entre le DIMSS-PM et TM puis le DIMSS-PM et le PV.

Les différentes relations semblent similaires pour nos deux catégories d'expertise ce qui peut suggérer qu'il n'y a pas de stratégies différentes mises en place entre les civils et les pilotes. Les différentes métriques semblent avoir la même sensibilité à la charge cognitive pour les deux catégories de participants dans les deux référentiels.

### 3.5. Stratégie motrice : EMG

Nous nous sommes précédemment intéressés à l'impact de l'indice de difficulté sur les métriques de charge de travail, de performance et de cinématique pour les deux groupes d'expertise. Maintenant, nous allons considérer l'impact de l'ID sur les métriques électromyographiques.

#### 3.5.1. Couple musculaire Biceps/Triceps

Nous commençons par les résultats du couple musculaire biceps/triceps. Nous avons étudié la co-activation au travers de 3 indices différents.

Dans un premier temps, la co-activation a été étudiée par l'index de co-activation de Kellis. Dans un second temps, cette métrique a été observée par l'index de Ervilha. Dans un dernier temps, nous l'étudions par la différence des intégrales.

Une augmentation des index de co-activation de Kellis, d'Ervilha et de la différence des intégrales a été observée dans les deux référentiels pour les civils. Concernant les pilotes, une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID a été remarquée uniquement pour la différence des intégrales dans les deux référentiels (voir Tableau 21).

Pour le référentiel géocentré, lors des comparaisons des civils avec les pilotes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur l'index de co-activation d'Ervilha

(estimate std.=1.146 error =2.462, t.value=0.466, p=0.6425) . Il y a des différences d'index de co-activation d'Ervilha uniquement pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =5.003, error =2.462, t.value= 2.032, p=0.044). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur le coefficient d'Ervilha (p>.05).

Aucune tendance du niveau d'expertise sur l'indice de co-activation de Kellis n'a été trouvée (« CategoriePilotes », estimate std.=1.118 error =3.250, t.value=0.344, p=0.732). Aucune différence de l'indice de co-activation de Kellis n'a été constaté pour tous les IDs (p>0.05) et il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie et l'indice de difficulté sur l'indice de Kellis.

Les comparaisons civils vs pilotes montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur la différence des intégrales (estimate std.=-0.001, error=0.004, t.value=-0.33, p=0.740) . Il y a des différences de valeur de la différence des intégrales pour l'ID2 (« ID2 », estimate std. =-0.021, error=0.004, t.value =-4.468, p=2.08^-05), l'ID3 (« ID3 », estimate std. =-0.26, error=0.004, t.value =-5.560 p=2.25^-07), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std.=-0.031, error=0.004, t.value =-6.582 p=2.16^-09) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =-0.032, error = 0.004, t.value= -6.753, p=9.69^-10). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur la valeur de la différence des intégrales (p>.05). Pour le référentiel égocentré, les mêmes résultats ont été retrouvés.

*Tableau 21 : Tableau des résultats des test statistiques pour des différentes métriques de co-activation du couple biceps/triceps pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables pour le couple Biceps/Triceps	Position-Géocentré	Position-Egocentré
<i>Kellis tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=5.946,p=0.0014</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=18.19, p=0.001</i>
<i>Kellis before PV civils</i>	<i>F(4,36)=1.645,p=0.215</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=5.84, p=0.21</i>
<i>Kellis after PV civils</i>	<i>F(4,36)=10.779,p=0.002 2/4, 3/4 et 2/5</i>	<i>F(4,36)=9.209,p=0.001, 1/4, 1/5 2/4</i>
<i>Ervilha tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=6.487,p=0.012</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=21.52, p=0.0002, W=0.538, 1/4, 1/5</i>
<i>Ervilha before PV civils</i>	<i>F(4,36)=2.117,p=0.147</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=4.64, p=0.32</i>
<i>Ervilha after PV civils</i>	<i>F(4,36)=12.891, p=0.001 1/4,1/5,2/3,2/4,2/5</i>	<i>F(4,36)=17.601,p=1.9^-05, 1/3, 1/4, 1/5, 2/4.</i>
<i>Diff int tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=11.6,p=0.001 1/2,1/3,1/4</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=16.32, p=0.002, 1/4 et 1/5</i>
<i>Diff int before PV civils</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=39.28, p=6.09^-08 sauf 3/4</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=38.72,p=7.95^-08 toutes sauf 3/4</i>
<i>Diff int after PV civils</i>	<i>F(4,36)=14.076,p=0.001, 1/2,1/3,1/4,1/5</i>	<i>F(4,36)=23.161, p=1.77^-05 1/2,1/3,1/4,1/5,2/5.</i>
Variables pour le couple Biceps/Triceps	Position-Géocentré	Position-Egocentré
<i>Kellis tout le mouvement pilotes</i>	<i>F(4,40)= 2.155, p=0.142</i>	<i>F(4,40)=1.22,p=0.315</i>
<i>Kellis before PV pilotes</i>	<i>F(4,40)=2.235, p=0.146</i>	<i>F(4,40)=4.631,p=0.028, 2/5</i>

<i>Kellis after PV pilotes</i>	$D(4,40)1.822, p=0.19$	$F(4,40)=0.566, p=0.54$
<i>Ervilha tout le mouvement pilotes</i>	$F(4,40)=2.666, p=0.101$	$F(4,40)=1.74, p=0.207$
<i>Ervilha before PV pilotes</i>	$F(4,40)=2.252, p=0.143$	$F(4,40)=4.283, p=0.037$
<i>Ervilha after PV pilotes</i>	$F(4,40)=3.695, p=0.047$	$F(4,40)=1.416, p=0.267$
<i>Diff int tout le mouvement pilotes</i>	$X^2(4)=11.63, p=0.02, 1/2$	$X^2(4)=14.61 p=0.005,$
<i>Diff int before PV pilotes</i>	$F(4,40)=48.817, p=5.38^{-07},$ <i>toutes les paires.</i>	$X^2(4)=41.81, p=1.81^{-08},$
<i>Diff int after PV pilotes</i>	$F(4,40)=9.391, p=0.005,$ $1/2, 1/5$	$X^2(4)=31.05, p=2.98^{-06},$ $1/5, 2/4, 2/5, 3/4, 3/5, 4/5.$

En résumé, ces résultats pour le couple biceps/triceps semblent montrer :

- Une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID pour le couple Biceps/Triceps avec la mesure de l'intégrale de la co-activation, principalement après le pic de vitesse dans les deux référentiels pour les deux catégories de participants.
- Une augmentation de l'ID sur les index de co-activation de Kellis et d'Ervilha pour les deux référentiels uniquement pour les participants civils.
- Aucune interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur les différents index de co-activation.

### 3.5.2. Couple musculaire Brachio-radial/Rond-pronateur

Maintenant, nous allons présenter les résultats du couple musculaire brachio-radial/rond-pronateur. Nous avons étudié la co-activation au travers des mêmes indices que pour le couple Biceps/Triceps (l'index de co-activation de Kellis, l'index de Ervilha, la différence des intégrales (voir Tableau 22).

Aucuns effets de l'ID sur les coefficients de co-activation de Kellis et d'Ervilha ont été constatés pour les civils pour les deux référentiels. Seul un effet de l'ID sur la différence des intégrales a été observé avec une diminution de l'intégrale (i.e. augmentation de la co-activation) pour la quasi-totalité des paires avec un effet de l'ID plus prononcé avant le pic de vitesse.

Pour l'étude des pilotes, l'effet de l'ID a été observé pour tous les index de co-activation dans le cadre du référentiel géocentré. Les post hoc pour les index de Kellis et d'Ervilha ne présentent aucune différence entre les paires ce qui peut expliquer un effet principal faible. Un effet de l'ID a été trouvé uniquement pour la différence des intégrales avec un effet localisé avant le pic de vitesse.

Dans le référentiel égocentré, une augmentation des index de co-activation de Kellis et d'Ervilha a été trouvée ainsi qu'une diminution de la différence des intégrales avec l'augmentation de l'ID principalement avant le pic de vitesse.

Pour le référentiel géocentré, concernant les comparaisons civils vs pilotes, aucune tendance du niveau d'expertise sur l'indice de co-activation d'Ervilha n'a été trouvée (estimate std.=-1.65 error =3.95, t.value=-0.419, p=0.676) et pour l'indice de Kellis (estimate std.=-1.40 error =4.12, t.value=-0.340, p=0.734). Aucunes différences pour les indices de co-activation d'Ervilha et de Kellis n'ont été constatées pour tous les IDs (p>0.05) et il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie et l'indice de difficulté sur ces deux indices.

Cependant, pour la différence des intégrales les comparaisons montrent aucune tendance du niveau d'expertise sur la différence des intégrales (estimate std.=-0.0003, error=0.003, t.value=-0.10, p=0.921). Il y a des différences de valeur de la différence des intégrales pour l'ID2 (« ID2 », estimate std. =-0.012, error=0.003, t.value =-4.174, p=6.40<sup>-05</sup>), l'ID3 (« ID3 », estimate std. =-0.016, error=0.003, t.value =-5.462 p=3.44<sup>-07</sup>), pour l'ID4 (« ID4 », estimate std.=-0.017, error=0.003, t.value =-5.718 p=1.12<sup>-07</sup>) et pour l'ID5 (« ID5 », estimate std. =-0.019, error = 0.003, t.value= -6.381, p=5.54<sup>-09</sup>). Il n'y a pas d'effet d'interaction entre la catégorie (pilote vs. civil) et l'indice de difficulté sur la valeur de la différence des intégrales (p>.05). Les mêmes résultats ont été observée pour le référentiel égocentré.

*Tableau 22 : Tableau des résultats des test statistiques pour des différentes métriques de co-activation du couple brachio/rond-pronateur pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables pour le couple Brachio/Rond-pronateur	Position-Géocentré	Position-Egocentré
<i>Kellis tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=0.309,p=0.693</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=2.72,p=0.605</i>
<i>Kellis before PV civils</i>	<i>F(4,36)=0.575, p=0.567</i>	<i>F(4,36)=0.725,p=0.485</i>
<i>Kellis after PV civils</i>	<i>F(4,36)=0.893,p=0.398</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=2.16,p=0.706</i>
<i>Ervilha tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=0.425,p=0.609</i>	<i>F(4,36)=0.218, p=0.782</i>
<i>Ervilha before PV civils</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=1.04,p=0.903</i>	<i>F(4,36)=0.571,p=0.549</i>
<i>Ervilha after PVcivils</i>	<i>F(4,36)=1.094,p=0.338</i>	<i>F(4,36)=0.51,p=0.583</i>
<i>Diff int tout le mouvement civils</i>	<i>F(4,36)=4.094,p=0.037 aucune paires</i>	<i>F(4,36)=32.88,p=1.26<sup>-06</sup> aucune paires</i>
<i>Diff int before PV civils</i>	<i>F(4,36)=48.693,p=1.65<sup>-07</sup> toutes les paires sauf ¾</i>	<i>X<sup>2</sup>(4)=32.88,p=1.26<sup>-06</sup>, , ½,1/3,1/4,1/5,2/3,2/5</i>
<i>Diff int after PV civils</i>	<i>F(4,36)=4.758,p=0.023 1/2</i>	<i>F(4,36)=11.855,p=0.002, ½,1/3,1/4,1/5,4/5</i>
Variables pour le couple Brachio/Rond-pronateur	Position-Géocentré	Position-Egocentré
<i>Kellis tout le mouvement pilotes</i>	<i>F(4,40)=5.823,p=0.022 aucune paires</i>	<i>F(4,40)=2.466,p=0.121</i>
<i>Kellis before PV pilotes</i>	<i>F(4,40)=4.156,p=0.041 aucune paire</i>	<i>F(4,40)=2.509, p=0.109</i>
<i>Kellis after PV pilotes</i>	<i>F(4,40)=5.899,p=0.02 ½,1/3</i>	<i>F(4,40)=2.355,p=0.13</i>
<i>Ervilha tout le mouvement pilotes</i>	<i>F(4,40)=6.442, p=0.019 aucune paires</i>	<i>F(4,40)=2.571,p=0.12</i>

<i>Ervilha before PV pilotes</i>	$F(4,40)=5.843, p=0.021$ <i>aucune paires</i>	$F(4,40)=3.32, p=0.065$
<i>Ervilha after PV pilotes</i>	$F(4,40)=6.466, p=0.02$ $1/2, 1/3$	$F(4,40)=2.223, p=0.15$
<i>Diff int tout le mouvement pilotes</i>	$X^2(4)=6.47, p=0.166$	$X^2(4)=10.32, p=0.035$ <i>aucune paires</i>
<i>Diff int before PV pilotes</i>	$F(4,40)=65.808, p=8.8^{-08}$ , <i>toutes les paires</i>	$F(4,40)=88.635, p=6.14^{-09}$ , <i>toutes les paires sauf 3/4.</i>
<i>Diff int after PV pilotes</i>	$X^2(4)=6.618, p=0.157$	$X^2(4)=36, p=2.89^{-07}$ , $1/3, 1/4, 1/5, 2/4, 2/5, 3/5.$

En résumé, les résultats pour le couple brachio-radial/rond-pronateur suggèrent que :

- Les index de co-activation de Kellis et d'Ervilha ne révèlent pas de variation du niveau de co-activation en fonction de l'ID pour les deux catégories de référentiel.
- La différence des intégrales révèle une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID préférentiellement avant le pic de vitesse pour les deux référentiels et pour les deux catégories (civils et pilotes).
- Aucun effet de l'expertise i.e. absence d'interaction entre l'ID et le niveau d'expertise ce qui n'indique pas d'effet différent du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur les différents index de co-activation.

### 3.5.3. Relation entre la charge de travail et l'EMG

#### 3.5.3.1. Couple Biceps/Triceps (BT)

Nous allons présenter les résultats concernant les relations entre les différentes mesures de co-activation et les scores du NASA-TLX (voir Tableau 23).

En condition géocentré, pour les civils, aucune corrélation n'a été observée entre le score « physique » en les scores du NASA-TLX et les index de co-activation (Kellis, Ervilha et la différence des intégrales). En condition égocentrée, des corrélations entre le score « mental » et les trois index de co-activations ont été observée et des corrélations inverse ont été trouvée entre le score « physique » et les trois index de co-activation. Aucunes corrélations n'ont été trouvées entre les différents index et le score « global ». Pour les deux référentiels, des corrélations moyenne ont été trouvées pour le score « mental » cela signifie que plus la co-activation augmente plus le score « mental » augmente.

Pour les pilotes, dans le référentiel géocentré, une corrélation positive entre le score « global » et l'index d'Ervilha a été constatée et des corrélations négatives entre les scores « global » / « mental » et la différence des intégrales ont été observées. Dans le référentiel égocentré, une corrélation négative a été remarquée entre le score « physique » et l'index d'Ervilha ainsi que des corrélations négatives entre les scores « global », « mental » et la différence des intégrales. Le score « physique » présente une corrélation négative avec l'indice de Kellis et une corrélation positive avec la différence des intégrales.

*Tableau 23 : Tableau des résultats des test statistiques pour des relations entre les différentes métriques de co-activation du couple biceps/triceps et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables pour BT	Position- Géocentré	Position-Egocentré
Kellis /Score global civils	$r=0.34, p=0.02.$	$r= 0.04, p=0.761.$
Kellis / Score mental civils	$r= 0.53, p=0.0001.$	$r= 0.42, p=0.003$
Kellis / Score physique civils	$r=-0.05, p=0.69.$	$r= -0.34, p= 0.02.$
Ervilha/ Score global civils	$r= 0.36, p=0.01.$	$r= 0.03, p=0.84.$
Ervilha / Score mental civils	$r= 0.57, p=3.91^{-05}.$	$r= 0.48, p=0.0008.$
Ervilha/Score physique civils	$r= -0.53, p=0.72.$	$r= -0.38, p=0.008.$
Diff int / Score global civils	$r= -0.47, p=0.0009.$	$r= -0.04, p=0.753.$
Diff int / Score mental civils	$r= -0.62, p=5.24^{-06}.$	$r= -0.54, p=9.76^{-05}.$
Diff int / Score physique civils	$r= -0.06, p=0.68.$	$r= 0.46, p=0.001.$
Variables pour BT	Position- Géocentré	Position-Egocentré
Kellis /Score global pilotes	$r= 0.23, p=0.12.$	$r=-0.01, p=0.94.$
Kellis / Score mental pilotes	$r= 0.23, p=0.127.$	$r=0.027, p=0.85.$
Kellis / Score physique pilotes	$r= 0.14, p= 0.34.$	$r=-0.33, p= 0.02.$
Ervilha/ Score global pilotes	$r=0.29, p=0.04.$	$r=0.05, p=0.714.$
Ervilha / Score mental pilotes	$r= 0.26, p=0.081$	$r=0.11, p=0.45.$
Ervilha/Score physique pilotes	$r=0.18, p=0.23.$	$r=-0.35, p=0.01.$
Diff int / Score global pilotes	$r=-0.57, p= 3.07^{-05}.$	$r= -0.44, p=0.001.$
Diff int / Score mental pilotes	$r= -0.78, p= 2.21^{-10}.$	$r= -0.72, p=1.67^{-08}.$
Diff int / Score physique pilotes	$r= -0.09, p= 0.51.$	$r= 0.39, p=0.01.$

Ces résultats montrent pour le couple biceps/triceps :

Dans un contexte géocentré :

- Des relations uniquement pour le score « global » et « mental » avec tous les indices de co-activations pour les civils,
- Des relations principalement entre les scores « global » et « mental » avec la différence des intégrales pour les pilotes.

Dans un contexte égocentré :

- Des relations uniquement pour le score « mental » et « physique » avec tous les indices de co-activation pour les civils, à noter que les corrélations sont opposées entre les relations du score « mental » et « physique ».
- Des relations majoritairement pour les trois scores avec la différence des intégrales pour les pilotes.

3.5.3.2. Couple Rond-pronateur/Brachioradial (BRRP)

Pour le référentiel géocentré, il y a la présence de corrélations entre les scores « global » et « mental » du NASA-TLX et la différence des intégrales pour les civils. Pour

les pilotes, des corrélations ont été observées entre le score « mental » et tous les indices de co-activation (voir Tableau 24).

Pour le référentiel égocentré, pour les civils des corrélations ont été constatées entre les scores « mental » et « physique » et la différence des intégrales. Pour les pilotes, des corrélations ont été trouvées entre le score « mental » et l'ensemble des indices de co-activation ; le score « physique » et les index de kellis, différences de intégrales, ainsi qu'entre le score « global » et la différence des intégrales.

*Tableau 24 : Tableau des résultats des test statistiques pour des relations entre les différentes métriques de co-activation du couple brachio/rond-pronateur et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.*

Variables pour BRRP	Position- Géocentrée	Position-Egocentrée
Kellis / Score global civils	$r=0.13, p=0.36.$	$r= -0.031, p=0.83.$
Kellis / Score mental civils	$r= 0.16, p=0.28.$	$r=-0.12, p=0.40.$
Kellis / Score physique civils	$r=-0.11, p=0.44.$	$r= 0.005, p=0.97.$
Ervilha/ Score global civils	$r= 0.08, p=0.55.$	$r= 0.019, p=0.89$
Ervilha / Score mental civils	$r= 0.16, p=0.29.$	$r= -0.09, p=0.52.$
Ervilha/Score physique civils	$r= -0.10, p=0.48.$	$r= -0.022, p=0.88.$
Diff int / Score global civils	$r= -0.49, p=0.0004.$	$r= -0.06, p=0.65.$
Diff int / Score mental civils	$r= -0.58, p=2.77^{-05}.$	$r= -0.52, p=0.0002.$
Diff int / Score physique civils	$r= 0.03, p=0.79.$	$r= 0.38, p=0.009.$
Variables pour BRRP	Position- Géocentré	Position-Egocentrée
Kellis / Score global pilotes	$r= -0.24, p=0.10.$	$r= -0.22, p=0.143.$
Kellis / Score mental pilotes	$r= -0.48, p=0.0007.$	$r=-0.31, p=0.03.$
Kellis / Score physique pilotes	$r= -0.005, p= 0.96.$	$r=0.32, p=0.02.$
Ervilha/ Score global pilotes	$r=-0.28, p=0.058.$	$r=-0.23, p=0.121.$
Ervilha / Score mental pilotes	$r= -0.53, p=0.0001.$	$r= -0.30, p= 0.04.$
Ervilha/Score physique pilotes	$r=-0.02, p=0.86.$	$r=0.28, p= 0.059.$
Diff int / Score global pilotes	$r=-0.58, p= 2.42^{-05}.$	$r=-0.39, p= 0.007.$
Diff int / Score mental pilotes	$r= -0.72, p= 2.44^{-08}.$	$r=-0.65, p=1.18^{-06}.$
Diff int / Score physique pilotes	$r= -0.15, p= 0.31.$	$r=0.30, p= 0.04.$

Ces résultats montrent pour le couple brachioradial/rond-pronateur que nous avons des corrélations de mêmes signes pour le score « mental » pour les deux catégories de participants. Nous avons la présence de corrélation entre le score « physique » et les indices de co-activation uniquement en référentiel égocentré pour les deux catégories.

## 4. Discussion chapitre 2

Pour résumer l'ensemble de nos résultats, nous avons réfuté en partie nos hypothèses. Notre première hypothèse semble être réfutée puisque nos résultats ne révèlent aucune différence entre les civils et les pilotes concernant l'évolution des métriques avec l'augmentation de la difficulté de la tâche.

Les résultats obtenus montrent que la dynamique du mouvement de pointage présente deux aspects : l'un mécanique et l'autre cognitif pour les deux catégories de participants. Comme nous l'avons expliqué dans le premier chapitre, certaines de nos métriques du mouvement sont dépendantes de la mécanique du mouvement et elles ne semblent pas représentative du coût cognitif dans notre tâche tandis que d'autres métriques sont dépendantes de l'aspect cognitif notamment du coût cognitif. Les résultats relatifs aux deux métriques de charge de travail (i.e., scores « mental » et « physique » du NASA-TLX et DIMSS-PM) montrent bien l'existence de ces deux aspects.

On a pu mettre en évidence que les scores du NASA-TLX augmentaient avec l'augmentation de la difficulté de la tâche pour les civils et les pilotes, avec une plus grande sensibilité pour le score « mental » par rapport aux scores « global » et « physique ». Nous avons également remarqué que les reports des scores à l'ID1 par les pilotes étaient plus élevés que ceux des civils, ce qui signifie que la perception des différents scores était surévaluée par les pilotes. Nos résultats montrent que l'augmentation de l'ID impacte principalement le score « mental » du NASA-TLX et qu'il semble sensible au coût cognitif dans notre étude pour les civils et les pilotes sans différences entre les deux.

Les valeurs du DIMSS-PM diminuent avec l'augmentation de l'ID et présentent une corrélation négative avec le score « mental » du NASA-TLX. Ces divergences de sensibilité face à l'augmentation de l'ID montrent que la mesure du DIMSS-PM ne semble pas sensible au coût cognitif associé à la réalisation de la tâche mais au caractère mécanique du mouvement à réaliser pour faire la tâche pour les deux catégories de participants pour les deux référentiels. Cette mesure ne semble pas pertinente pour évaluer la charge cognitive dans notre tâche.

Les résultats des métriques de performances et de cinématiques montrent l'impact lié au traitement de la quantité d'information lors de l'augmentation de la charge cognitive inhérente à la réalisation de la tâche pour les deux catégories de participants. La performance diminue avec l'augmentation de la difficulté de la tâche tant au niveau du nombre de portes validées que de la performance du temps de mouvement de la même façon pour les civils et pour les pilotes. Cette diminution de la performance montre une sensibilité des métriques de performance et de cinématique vis-à-vis de la charge cognitive. Cette sensibilité semble similaire pour les civils que pour les pilotes puisque qu'aucune interaction a été retrouvée entre la difficulté de la tâche et le niveau d'expertise ce qui signifie qu'il ne semble pas avoir d'effet du niveau d'expertise entre les différents niveaux de difficulté de la tâche sur nos différentes métriques (charge de travail, cinématique et musculaire). Nous retrouvons des modifications de la linéarité du mouvement du pattern cinématique similaires pour les civils et les pilotes ce qui a été appuyé par l'absence d'effet du niveau d'expertise entre les différentes difficultés pour la position du pic de vitesse. Nous retrouvons uniquement un maintien de la performance

entre l'ID2 et ID4 à la fois pour les civils et pour les pilotes. Pour confirmer, le maintien de cette performance des études approfondies doivent être effectués ainsi que des modèles statistiques plus complexes pour pouvoir affirmer ou invalider ces conclusions.

Cependant, on peut constater que les métriques de cinématique et de performance du mouvement sont sensibles aux variations de la quantité d'information à traiter et par conséquent à la charge cognitive induite par le traitement d'information pour les deux catégories de participants. Les relations entre le score « mental » du NASA-TLX / TM et score mental /PV, montrent des corrélations positives. Ceci permet de suggérer que les métriques cinématiques sont dépendantes du niveau d'exigence informationnelle de notre tâche et notamment qu'elles sont sensibles au coût cognitif qu'on soit civil ou pilote. Ces mêmes mesures de TM et position du pic de vitesse ont des corrélations négatives avec le DIMSS-PM ce qui vient renforcer l'idée que le DIMSS-PM n'est pas sensible au coût cognitif.

En résumé, le score « mental » du NASA-TLX, les mesures de performances et de cinématique semblent dépendantes de la charge cognitive inhérente à l'exécution de notre tâche. Ces métriques ne semblent pas être impactées par l'expertise de pilotage du participant.

Ce chapitre nous a permis au travers des analyses EMG de montrer que l'influence de l'ID sur les métriques EMG sont similaires entre les deux groupes et que cette influence semble de même signe pour les deux. Ces résultats nous permettent de supposer qu'il ne semble pas avoir de différence de stratégie musculaire entre les civils et les pilotes. Nous avons déterminé qu'il y a une sensibilité principalement du couple biceps/triceps pour les différents index de co-activation (Ervilha et l'intégrale des différences agoniste-antagoniste) à la quantité d'information à traiter i.e. une augmentation de la co-activation avec l'ID pour les deux catégories de participants. Cette sensibilité n'était pas différente d'un groupe à l'autre. Nous avons caractérisé une sensibilité de la métrique de Ervilha et l'intégrale des différences agoniste/antagoniste au coût cognitif avec une corrélation positive entre le score « mental » et ces mesures pour les civils et pour les pilotes. Nous avons constaté des différences de sensibilités des index de Kellis et Ervilha pour les civils et les pilotes dans la condition géocentrée. La stratégie motrice mise en place semble similaire peu importe le niveau d'expertise au pilotage des participants. Pour le couple Brachio-radial/Rond-pronateur, nous avons une stratégie similaire qui est observable pour les civils et pour les pilotes avec une co-activation principalement visible avec la différence des intégrales.

Ce troisième chapitre a permis de discuter les résultats des expériences 1 et 2 en tenant compte du niveau d'expertise de pilotage des participants (civils versus pilotes). Nous avons mis en évidence que pour l'ensemble de nos métriques les stratégies sont similaires avec l'augmentation de l'ID pour les civils et les pilotes et qu'aucune différence a été retrouvée entre les deux catégories d'expertise pour l'ensemble des métriques.

L'absence d'effet d'expertise peut s'expliquer par le critère d'expertise. Nos résultats suggèrent que l'expertise de pilotage n'est peut-être pas un critère adapté pour notre tâche. Dans la littérature, l'effet de l'expertise a été montré tant dans le domaine de la charge cognitive que celle du contrôle moteur. Dans le domaine de la charge cognitive la théorie de l'expertise ([Farrington-Darby & Wilson 2006](#)) avait mis en évidence

l'augmentation de l'efficacité du traitement de l'information des experts d'une tâche. Dans celui du contrôle moteur, une étude phare sur des mouvements de slalom dans un simulateur de ski (Vereijken et al 1991) avaient montré que la pratique (i.e. l'expertise spécifique à une tâche) amenait à des changements de stratégies au niveau de l'usage des degrés de liberté du mouvement. Ces études nous font dire que le critère d'expertise choisi (i.e. l'expertise de pilotage) n'était pas pertinent pour notre tâche. La tâche de Fitts n'est pas une tâche de pilotage et l'expertise propre à l'action de pilotage ne demande pas une expertise spécifique à des mouvements contrôlés dans un conflit vitesse-précision. Pour étudier, l'expertise dans notre tâche nous aurions dû définir un critère d'expertise spécifique à la tâche réciproque de Fitts.

Nous avons exploré l'effet d'expertise pour relations entre les métriques de charge de travail et nos métriques de caractérisation des coordinations motrices pour un mode de contrôle en position dans les deux référentiels. Maintenant, nous allons voir si le fait de changer de mode de contrôle va induire des modifications de l'effet de la difficulté sur nos métriques et si leurs relations au coût cognitif sont impactées.

## **CHAPITRE 3 : Etude des relations entre métriques de charge de travail et métriques de caractérisation des coordinations motrices pour un mode de contrôle en vitesse**

Le premier chapitre a montré l'effet de la difficulté de la tâche sur les différentes mesures (cinématique, EMG, charge de travail) pour les deux référentiels en mode de contrôle en position. Il a permis de déterminer la nature des relations entre les mesures liées au mouvement et à la charge cognitive pour des référentiels géocentré et égocentré dans un mode de contrôle en position. Puis, le chapitre précédent a montré l'effet d'expertise de nos participants sur les différentes métriques ainsi que la présence de relations entre les métriques pour chaque groupe.

Maintenant, nous allons explorer la modulation de ces relations en les observant dans un mode de contrôle en vitesse pour les deux référentiels. Le mode de contrôle des commandes d'un hélicoptère repose sur les équations de la dynamique de vol et les adaptations des différentes lois de commandes appliquées (notamment avec celles d'un pilote automatique). Dans un hélicoptère, certaines commandes permettent de contrôler la vitesse angulaire autour d'un axe (i.e. tangage, roulis ou lacet) mais parfois il y a des combinaisons de mode de contrôle comprenant un mode de contrôle accélération/vitesse. Nous avons voulu nous placer dans un mode de contrôle qui se rapproche du contrôle des commandes d'hélicoptère : le mode de contrôle en vitesse.

L'objectif de ce troisième chapitre consiste à explorer la nature des relations entre les mesures des scores du questionnaire du NASA-TLX et les métriques relatives aux coordinations motrices (i.e. performance, cinématiques et électromyographiques) pour un mode de contrôle en vitesse appliqué au manche. Le mode de contrôle en vitesse semble amener une modification de la performance du mouvement deux fois plus importante qu'un contrôle en position (Jagacinsky, 1978). Cependant, de par notre design expérimental nous ne pourrions pas comparer les résultats des deux modes de contrôle. Nous analyserons uniquement les variables et les relations dans ce nouveau cadre pour valider la robustesse des métriques et des relations trouvées dans le chapitre 1.

Dans le but d'étudier la robustesse de nos métriques, nous aurons les mêmes hypothèses que dans les chapitres précédents : nous avons (1) étudié l'effet de l'augmentation des contraintes de la tâche (i.e. ID) sur les mesures de performance, du mouvement (cinématique/EMG) et de la charge cognitive (score « mental » du questionnaire du NASA-TLX). Nous avons (2) exploré les relations entre les mesures de charge de travail et les métriques du mouvement (cinématiques, électromyographiques et de performance).

### **1. Matériel et méthodes**

#### **1.1. Participants**

Nous avons eu un groupe de 21 participant(e)s droitier(e)s pour ces expériences dont 10 pilotes et 11 civils avec un âge moyen de 31.28 ans (sd : 5.97 ans) comprenant 5 femmes et 16 hommes.

## 1.2. Protocole

Dans ces deux expériences, le mode de contrôle en vitesse a été utilisé. Les participants ont fait la même tâche de pointage réciproque entre les deux cibles comme décrit dans la partie Méthodologie générale. Le curseur en vitesse a été utilisé de sorte qu'à une position du manche correspond une vitesse du curseur dans l'espace virtuel de simulation. Pour ces expériences en mode de contrôle en vitesse, la tâche a été effectuée en référentiel géocentré et en référentiel égocentré. Pour chaque référentiel un gain de vitesse différent a été choisi (Figure 39).

## 1.3. Métriques et analyses

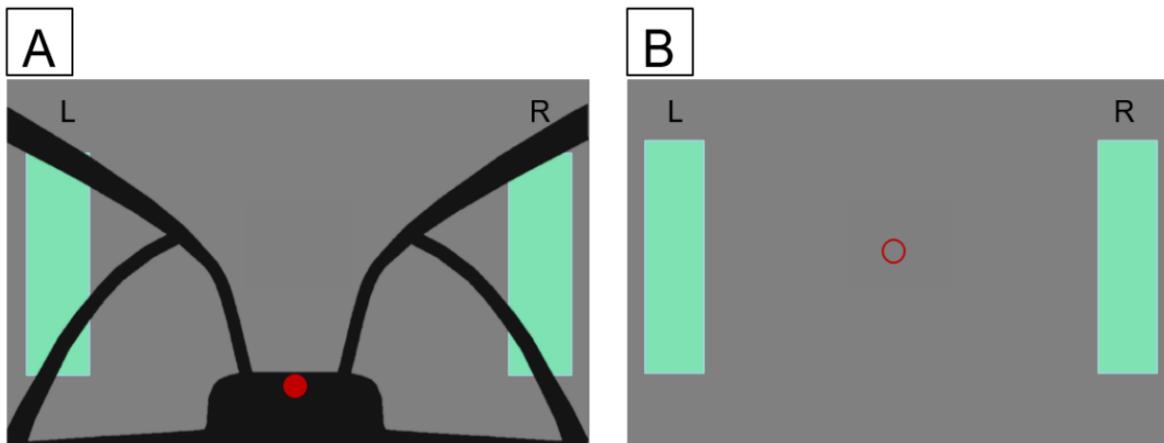


Figure 39 : Schéma représentant le visuel de la simulation des participants en référentiel égocentré (A) et géocentré (B).

Dans ces deux expériences, la difficulté de la tâche (i.e. ID) a été manipulée avec 5 niveaux de difficulté (1 étant le plus facile et 5 le plus difficile).

Les variables dépendantes recueillies sont listées dans le Tableau 25. Toutes nos variables ont été traitées et analysées comme décrit dans la partie Méthodologie générale. Les variables traitées sont identiques pour les deux expérimentations.

A noter que dans ce chapitre le temps de mouvement et la position du pic de vitesse sont calculés à la fois dans l'espace de la tâche et dans l'espace effecteur. Ces variables sont différentes dans les deux espaces car le mouvement du curseur analysé dans l'espace de la tâche n'est pas représentatif du mouvement du bras effectué sur le manche (analysé dans l'espace effecteur).

Tableau 25 : Tableau représentant les variables dépendantes pour les expériences 3 et 4 suivis d'un tableau des variables dépendantes dans leur espace de traitement.

Catégorie de variables	Nom de la variable dépendante
Cinématique	Temps de mouvement tâche (TMt)
	Temps de mouvement effecteur (TMe)
	Position du pic de vitesse tâche (PVt)
	Position du pic de vitesse effecteur (PVe)

<i>Electromyographique</i>	<i>Activité musculaire par muscle Index de co-activation de Kellis Index de co-activation Ervilha Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste</i>
<i>Questionnaire NASA-TLX</i>	<i>Score « global », « mental » et « physique »</i>
<b>Espace de la tâche</b>	<b>Espace effecteur</b>
<i>Nombre de cibles validées Temps de mouvement tâche (TMT) Position du pic de vitesse tâche (PVt)</i>	<i>Temps de mouvement effecteur (TMe) Position du pic de vitesse effecteur (PVe)  Activité musculaire par muscle Index de co-activation de Kellis Index de co-activation d'Ervilha Intégrale de la différence de co-activation agoniste-antagoniste</i>

## 2. Hypothèses des expériences 3 et 4

Globalement, les hypothèses pour les expériences 3 et 4 sont les mêmes que pour le chapitre 1.

Notre première hypothèse postulait qu'une augmentation de l'ID s'accompagnait d'une augmentation du coût cognitif visible à la fois sur la métrique de charge de travail du NASA-TLX ainsi que sur les métriques liées au mouvement. Plus précisément, nous avons les sous-hypothèses suivantes concernant l'impact de l'augmentation de l'ID sur nos métriques :

- (1) Augmentation du score « mental » du NASA-TLX.
- (2) Diminution de la performance (tâche et cinématique).
- (3) Modification de la stratégie motrice (cinématique).
- (4) Augmentation de la co-activation (EMG).

Notre seconde hypothèse postulait l'existence d'une relation entre la mesure du score « mental » du NASA-TLX et nos différentes métriques du mouvement.

## 3. Résultats des expériences 3 et 4

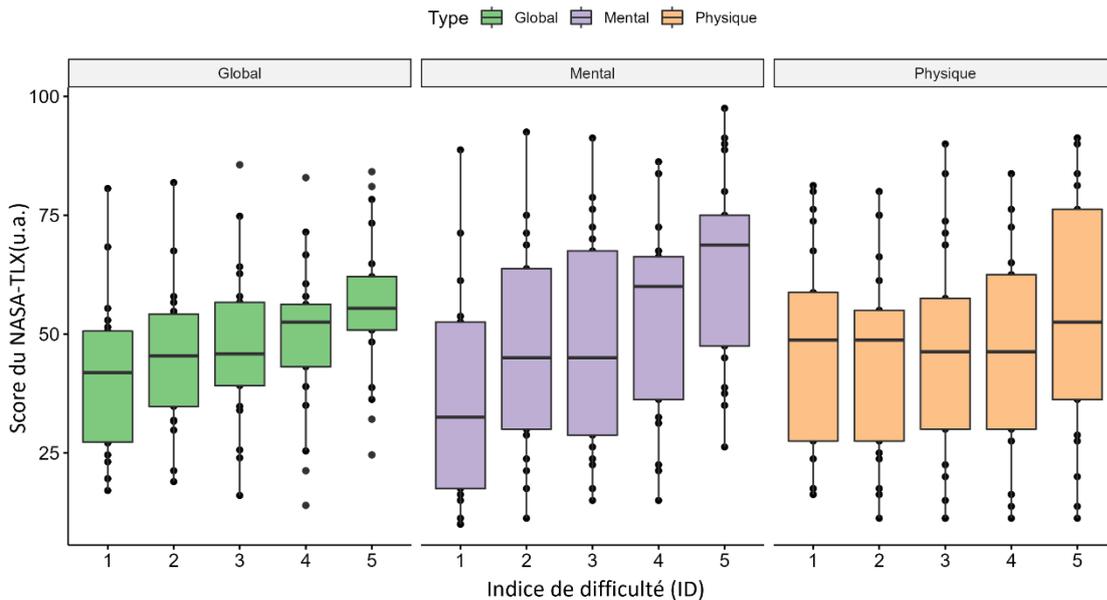
### 3.1. Résultats sur la charge de travail : questionnaire NASA-TLX

Dans ces deux expériences, nous avons fait l'hypothèse que la charge mentale telle qu'elle est quantifiée par le score « mental » du questionnaire NASA TLX augmente avec le niveau de difficulté de la tâche.

Afin de tester cette hypothèse, les différents scores du questionnaire NASA-TLX en fonction de l'ID ont été exploré.

Tout d'abord, les résultats révèlent un effet significatif de l'ID sur le score du questionnaire NASA-TLX pour le référentiel géocentré (voir Tableau 30). Pour le référentiel égocentré, un effet significatif est retrouvé pour les scores « global » et « mental » mais pas d'effet de l'ID sur le score « physique » (voir Tableau 26 et Figure 40).

**A** Scores des différents Types de scores du NASA-TLX pour l'ensemble des IDs  
En condition VGEO Pour tous



**B** Scores des différents Types de scores du NASA-TLX pour l'ensemble des IDs  
En condition VEGO Pour tous

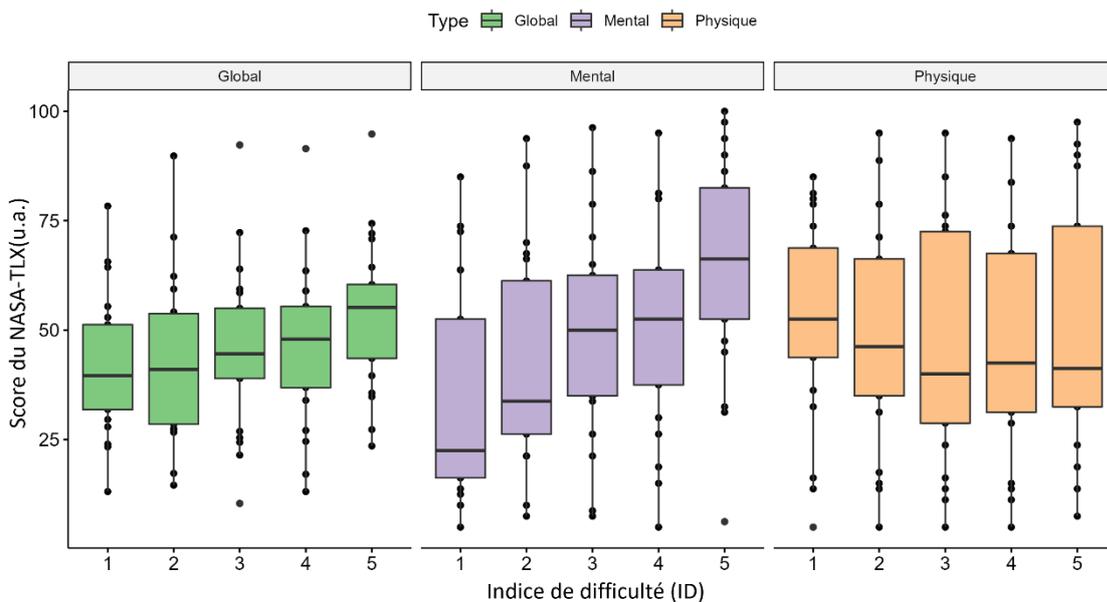


Figure 40 : Graphiques des différents scores du NASA-TLX en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

*Tableau 26 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le score « mental » du NASA-TLX pour les deux référentiels.*

Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Score Global	$F(4,80)=25.25, p=4.36^{-08}$ (sauf 2/3, 2/4 et 3/4)	$F(4,80)=13.828, p=2.08^{05}$ (sauf 1/2, 1/3, 1/4, 2/3, 2/4, 3/4, 3/5)
Score Mental	$F(4,80)= 36.632, p=2.18^{-10}$ (*pour toutes les paires sauf ID2-ID3)	$\chi^2(4) =54.844, p= 3.50^{-11}$ (* pour toutes les paires sauf ID2-ID4, ID3-ID4).
Score Physique	$F(4,80)=6.036, p=0.004$ (sauf 1/2, 1/3, 1/4, 2/3, 2/4, 2/5, 3/4, 3/5)	$F(4,80)= 2.712, p=0.097$

Ces premiers résultats montrent une sensibilité plus marquée pour le score « mental » lors de l'augmentation de la difficulté sauf entre les difficultés intermédiaires pour les deux référentiels. Le score « mental » semble sensible à la difficulté de la tâche. Cependant, une sensibilité au score « global » est retrouvée pour les deux référentiels avec moins de différences significatives entre les paires. Enfin, le score « physique » présente une sensibilité partielle pour le référentiel géocentré.

### 3.2. Stratégie motrice : performance de la tâche et performance de la cinématique du mouvement

Nous allons à présent considérer les métriques de performance (tâche et effecteur). Pour rappel, l'espace de la tâche est défini comme l'environnement virtuel donc la performance de la tâche est caractérisée par le déplacement du curseur à l'écran. L'espace de l'effecteur est celui dans lequel nous analysons les mouvements du bras du participant. Les deux espaces dans ce chapitre ont été distingués, car en mode de contrôle en vitesse le déplacement du curseur à l'écran ne correspond pas au déplacement du bras au niveau du manche. Le participant contrôle une vitesse de déplacement du curseur à l'écran. Pour atteindre la première cible, il va générer le déplacement du curseur vers la cible en effectuant un mouvement sur le manche. Puis, il va attendre avec une position du bras fixe au niveau du manche, le temps que le curseur arrive dans la cible. Pour ne pas overshooter la cible, le participant doit anticiper l'abord de la cible en impulsant le mouvement retour avant que le curseur n'arrive dans la cible. Ces différences entre la cinématique du curseur et la cinématique du mouvement du bras, nous ont obligé à étudier les deux espaces.

Dans ces expériences, nous faisons l'hypothèse que la performance se dégrade avec l'augmentation de l'ID.

Concernant l'effet de l'ID sur la performance dans l'espace de la tâche, la performance diminue significativement (i.e. nombre de cibles validées) avec l'augmentation de l'ID pour les deux référentiels. Il y a principalement des différences entre l'ID1 et les autres difficultés pour le référentiel égocentré, ce qui révèle que la performance de la tâche se dégrade moins entre les ID2 et ID4 (voir Tableau 27 et Figure 41).

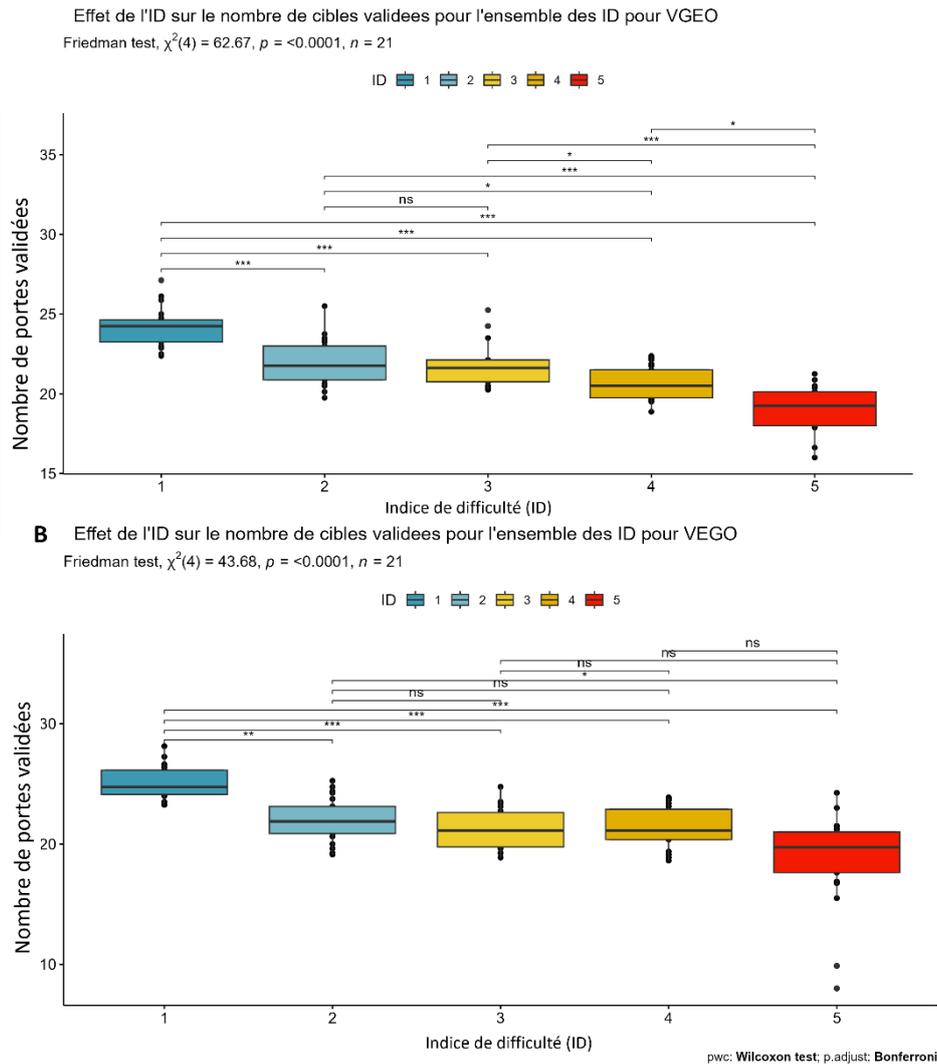


Figure 41 : Graphiques du nombre de portes validées en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).

Tableau 27 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le nombre de portes validées pour les deux référentiels.

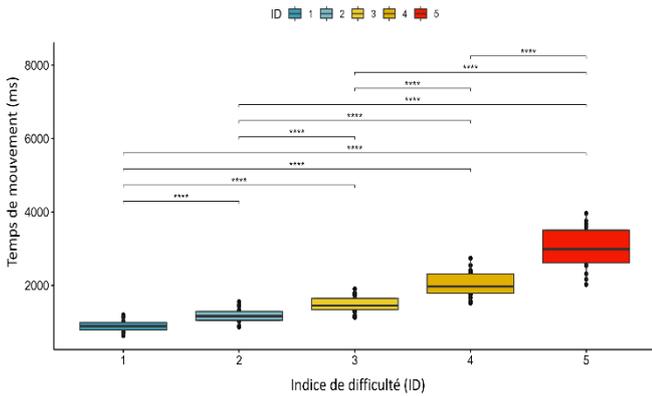
Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Nombres de portes validées	$\chi^2(4)=62.66, p=7.79 \times 10^{-13}$ , sauf ID3-ID4.	$\chi^2(4) =43.682, p=7.4 \times 10^{-9}$ Rajouter les paires

Concernant les temps de mouvement (TMt et TMe), ils augmentent significativement avec l'augmentation de l'ID avec des différences significatives entre toutes les paires d'ID pour les deux référentiels. En d'autres termes, la performance du mouvement diminue avec l'indice de difficulté (i.e., les participants mettent plus de temps à effectuer la tâche) dans les deux espaces (tâche et effecteur) (voir Tableau 28 et Figure 42).

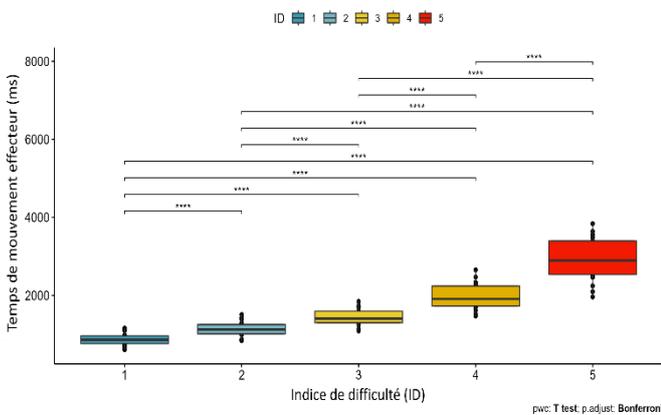
Tableau 28 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'ID sur le TMt et le TMe pour les deux référentiels.

Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Temps de mouvement (TMt)	$F(4,80) = 428.836, p = 3.67 \times 10^{-18}$ , toutes les paires.	$F(4,80) = 339.668, p = 1.71 \times 10^{-15}$ toutes les paires.
Temps de mouvement (TMe)	$F(4,80) = 439.359, p = 2.59 \times 10^{-18}$ , toutes les paires.	$F(4,80) = 342.966, p = 1.51 \times 10^{-15}$ toutes les paires.

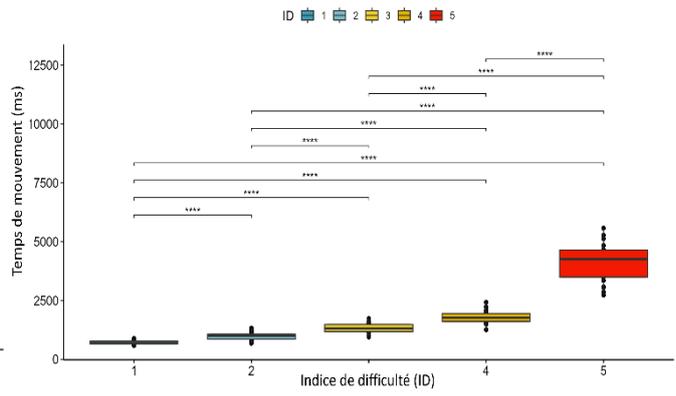
A Effet de l'ID sur le temps de mouvement pour l'ensemble des ID pour VGEO  
Anova,  $F(1,25,24.97) = 428.84, p < 0.0001, \eta_p^2 = 0.85$



Effet de l'ID sur le temps de mouvement pour l'ensemble des ID pour VGEO  
Anova,  $F(1,25,24.97) = 428.84, p < 0.0001, \eta_p^2 = 0.85$



B Effet de l'ID sur le temps de mouvement pour l'ensemble des ID pour VEGO  
Anova,  $F(1,12,22.49) = 339.67, p < 0.0001, \eta_p^2 = 0.9$



Effet de l'ID sur le temps de mouvement pour l'ensemble des ID pour VEGO  
Anova,  $F(1,12,22.49) = 339.67, p < 0.0001, \eta_p^2 = 0.9$

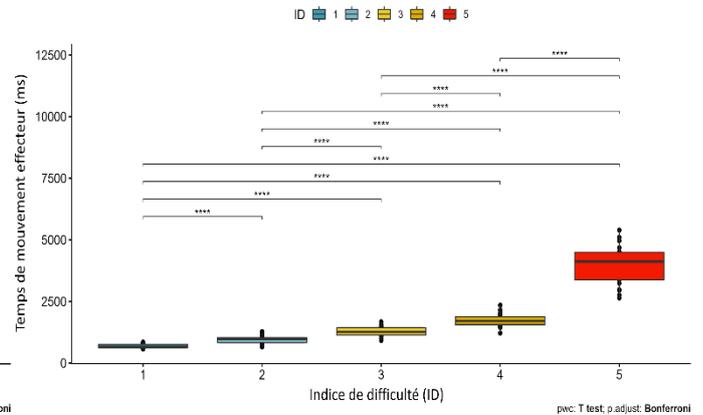


Figure 42 : Graphiques (A) du TMt à gauche et du TMe à droite en fonction de la difficulté de la tâche et pour (le référentiel géocentré (A) et égocentré (B)).

### 3.3. Stratégie motrice : cinématique du mouvement.

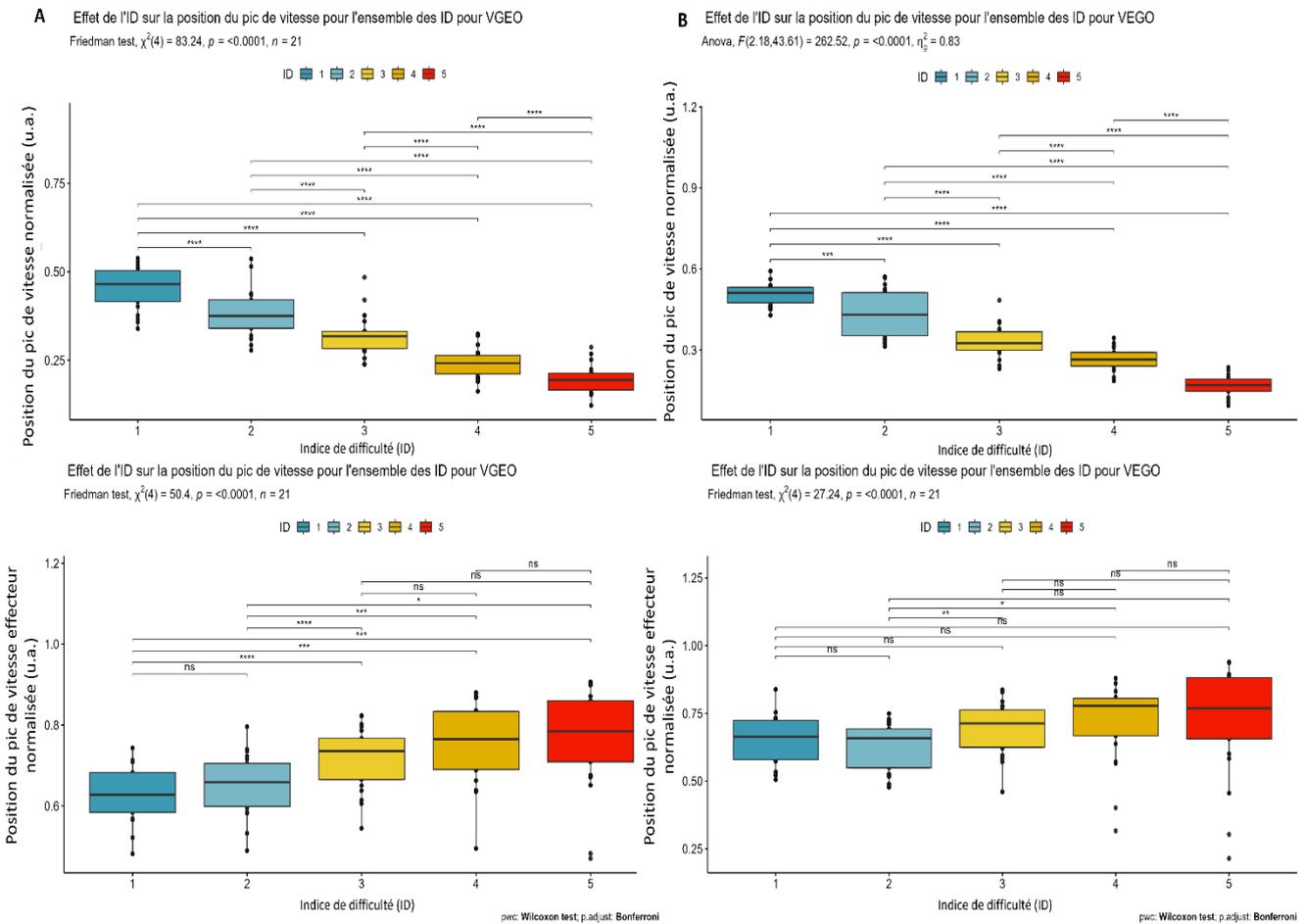
Dans ces expériences, nous faisons l'hypothèse que la cinématique du mouvement se dégrade avec l'augmentation de l'ID i.e. par des modifications cinématiques.

Nous allons présenter les résultats concernant l'effet de l'ID sur les différentes mesures de la cinématique du mouvement (pic de vitesse et durée de la phase d'accélération).

Un décalage de la position du pic de vitesse dans l'espace de la tâche (PVT) a été constaté i.e. le pic de vitesse arrive plus tôt avec l'augmentation de l'ID. Cependant, un décalage différent de la position du pic de vitesse dans l'espace de l'effecteur a été trouvé i.e. le pic de vitesse arrive cette fois plus tard avec l'augmentation de l'ID uniquement pour la paire ID2-ID3 et ID2-ID4 pour les deux référentiels (voir Tableau 29 et Figure 43).

*Tableau 29 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le PVt et le PVe pour les deux référentiels.*

Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Position du pic de vitesse (PVt)	$\chi^2(4)=83.33, p=3.5^{-17}$ , toutes les paires.	$F(4,80)=262.525, p=1.15^{-25}$ , toutes les paires.
Position du pic de vitesse (PVe)	$\chi^2(4)=50.4, p=297^{-10}$ , toutes sauf ID1-ID2, ID3-ID4, ID3-ID5 et ID4-ID5.	$\chi^2(4)=27.23, p=1.77^{-05}$ . AJOUT PAIRES



*Figure 43 : Graphiques du PVt à gauche et du PVe à droite en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B).*

Ce résultat montre que la position du pic de vitesse dans l'espace effecteur arrive plus tard avec l'augmentation de l'ID. Le mode de contrôle en vitesse implique un mouvement en « impulsion » i.e. on impulse le mouvement puis on attend que le curseur atteigne la

cible en ayant le bras immobile. Ceci implique que le participant anticipe et impulse le mouvement de pointage retour avant de terminer son demi-cycle (i.e. atteindre la cible) dans l'espace de la tâche. La cinématique dans l'espace de la tâche et dans l'espace effecteur sont différents. A l'ID5 l'impulsion est plus faible car la vitesse de départ est plus faible i.e. le participant attend plus longtemps avant de changer de mouvement. Nous retrouvons cela avec une valeur du pic de vitesse plus faible à l'ID5 qu'à l'ID1. Ces différences entre les deux espaces (tâche et effecteur) se retrouvent pour les deux référentiels.

### 3.3.1. Relation entre la charge mentale, la performance et la cinématique avec l'augmentation de l'ID

Maintenant que nous avons vu comment évoluent la mesure de la charge de travail, les mesures de performances et les mesures de caractérisation des stratégies motrices en fonction de l'ID, nous allons étudier leur relation vis-à-vis des scores du NASA-TLX.

#### 3.3.1.1. Relation score « mental » NASA-TLX et la performance du mouvement

Nous avons étudié la relation entre les scores du NASA-TLX et le TM (performance cinématique).

Une corrélation forte positive a été observée entre les scores « global » et « mental » et le TMT pour les deux référentiels. Une corrélation moyenne est constatée entre le score « physique » et le TMT uniquement pour le référentiel géocentré (voir Tableau 29).

Les mêmes relations sont retrouvées avec TMe pour les deux référentiels.

*Tableau 29 : Tableau des résultats des tests statistiques pour la relation entre le score « mental » et le TMT puis le TMe pour les deux référentiels.*

Variables	Vitesse – Géocentré	Vitesse - Egocentré
Score Global vs TMT	$r=0.713, p=1.86^{-14}$	$r=0.634, p=6.775^{-11}$
Score Mental vs TMT	$r=0.742, p=4.271^{-16}$	$r=0.717, p=1.074^{-14}$
Score Physique vs TMT	$r=0.442, p=2.22^{-05}$	$r=0.26, p=0.248$
Variables	Vitesse – Géocentré	Vitesse - Egocentré
Score Global vs TMe	$r=0.713, p=1.86^{-14}$	$r=0.634, p=6.778^{-11}$
Score Mental vs TMe	$r=0.743, p=3.814^{-16}$	$r=0.717, p=1.121^{-14}$
Score Physique vs TMe	$r=0.441, p=2.38^{-05}$	$r=0.125, p=0.251$

#### 3.3.1.2. Relation score « mental » NASA-TLX et Cinématique du mouvement

Nous avons étudié la relation entre les scores du NASA-TLX et la position du pic de vitesse (cinématique).

Une corrélation négative forte a été constatée entre les scores « global » et « mental » et le PVt pour les deux référentiels. Une corrélation moyenne est remarquée entre le score « physique » et le PVt uniquement pour le référentiel géocentré.

Une corrélation positive moyenne a été observée entre les scores « global » et « mental » et le PVe pour le référentiel géocentré uniquement. Pour le référentiel égocentré, seule une corrélation moyenne négative a été constatée entre le score « physique » et le PVe. Ceci signifie que lorsque la position du pic de vitesse augmente le score « physique » diminue (voir Tableau 30).

*Tableau 30 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre le score « mental » et le PVt puis le PVe pour les deux référentiels.*

Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Score Global vs PVt	$r=-0.679, p=8.977^{-13}$	$r= -0.589, p= 2.999^{-09}$
Score Mental vs PVt	$r= -0.758, p=4.14^{-17}$	$r= -0.758, p=4.332^{-17}$
Score Physique vs PVt	$r=-0.282, p=0.0087$	$r= 0.053, p=0.626$
Variables	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Score Global vs PVe	$r=0.399, p=0.0015$	$r= -0.071, p=0.518$
Score Mental vs PVe	$r=0.470, p=5.411^{-06}$	$r= 0.072, p=0.511$
Score Physique vs PVe	$r= 0.0047, p=0.965$	$r= -0.283, p=0.008$

Ces deux résultats montrent que des relations existent entre les scores du NASA-TLX et la mesure de performance cinématique (TMt et TMe). Le score « mental » présente une plus forte corrélation et par conséquent une sensibilité à l’augmentation de l’ID pour les deux référentiels. Le score « mental » semble sensible à la manipulation de la quantité d’information à traiter (ID). En effet, nous avons une forte corrélation positive entre le score « mental » du NASA-TLX avec les temps de mouvement (TMt et TMe).

Nous notons la présence d’une relation entre le score « mental » du NASA- TLX avec la position du pic de vitesse de la tâche (PVt) par une corrélation négative entre les deux. Cette corrélation négative signifie que lorsque le pic de vitesse diminue le score « mental » augmente, ce qui se caractérise par une position du pic de vitesse qui arrive plus tôt. Le décalage du pic de vitesse semble être en relation avec une augmentation de la charge cognitive liée à l’augmentation de l’ID. Nous remarquons une relation entre le score « mental » du NASA-TLX et le PVe uniquement pour le référentiel géocentré. Concernant le score « global », des relations moyennes existent pour les deux référentiels avec PVt et uniquement pour le référentiel géocentré pour PVe. Le score « physique » présente une faible relation en référentiel géocentré pour le PVt. Ce qui signifie que lorsque la position du pic de vitesse du curseur augmente le score physique diminue. Le score « physique » présente une corrélation avec le PVe uniquement en référentiel égocentré. Ce qui signifie pour ce dernier que lorsque la position du pic de vitesse (espace effecteur) se déplace i.e. arrive plus tard, le score « physique » diminue.

### 3.4. Stratégie motrice : EMG

#### 3.4.1. Couple musculaire Biceps/Triceps (BT)

Nous commençons par les résultats du couple musculaire biceps/triceps. La co-activation a été étudié au travers de 3 indices différents. Dans un premier temps, la co-activation a été analysée par l'index de co-activation de Kellis. Dans un second temps, cette métrique a été observé par l'index de Ervilha. Dans un dernier temps, la différence des intégrales a été étudiée (voir Tableau 31).

Aucun effet de l'ID sur les coefficients de co-activation de Kellis et d'Ervilha a été observé pour les deux référentiels. Un effet significatif de l'ID pour la différence des intégrales a été constaté pour toutes les paires sauf entre l'ID3-ID4 pour les deux référentiels. Un effet de l'ID plus prononcé avant le pic de vitesse pour le référentiel géocentré et après le pic de vitesse pour le référentiel égocentré

*Tableau 31 : Tableau des résultats des test statistiques de l'effet de l'ID sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps pour les deux référentiels.*

Variables pour Biceps/Triceps	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Kellis tout le mouvement	$F(4,80)=0.397, p=0.638$	$X^2(4)=1.104, p=0.89$
Kellis before PVe	$F(4,80)=0.558, p=0.52$	$F(4,80)=0.469, p=0.609$
Kellis after PVe	$F(4,80)=1.172, p=0.319$	$X^2(4)=2.78, p=0.59$
Ervilha tout le mouvement	$X^2(4)=5.06, p=0.280$	$X^2(4)=3.27, p=0.051$
Ervilha before PVe	$X^2(4)=8.76, p=0.06$	$X^2(4)=1.02, p=0.905$
Ervilha after PVe	$X^2(4)=4.60, p=0.329$	$X^2(4)=3.27, p=0.512$
Diff int tout le mouvement	$F(4,80)=39.085, p=2.35^{-08}$ sauf 3/4	$X^2(4)=60.15, p=2.69^{-12}$ , sauf 3/4
Diff int before PVe	$F(4,80)=28.843, p=4.29^{-07}$ sauf 3/4, 3/5, 4/5	$X^2(4)=62.057, p=1.07^{-12}$ sauf 3/4
Diff int after PVe	$F(4,80)=16.416, p=1.77^{-05}$ sauf 2/3, 2/4, 2/5, 3/4, 3/5, 4/5	$X^2(4)=52.26, p=1.21^{-10}$ , 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 2/3, 2/5, 3/5, 4/5

En résumé, ces résultats pour le couple biceps/triceps semblent montrer :

Pour les deux référentiels :

- Une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID pour le couple Biceps/Triceps uniquement par la mesure de l'intégrale de la co-activation, principalement et de façon plus prononcée avant le pic de vitesse pour le référentiel géocentré et après le pic de vitesse pour le référentiel égocentré.
- Aucun effet de l'ID sur les index de co-activation de Kellis et d'Ervilha.

### 3.4.2. Couple musculaire Brachioradial/Rond-pronateur (BRRP)

Maintenant, nous allons présenter les résultats du couple musculaire brachio-radial/rond-pronateur. La co-activation a été étudiée au travers des mêmes indices que pour le couple Biceps/Triceps (voir Tableau 32).

Pour le référentiel géocentré, seule la différence des intégrales présente un effet de l'ID, avec une diminution significative avec l'augmentation de l'ID, principalement avant le pic de vitesse.

Pour le référentiel égocentré, une diminution des index de co-activation de Kellis et d'Ervilha a été constatée. Une diminution de la différence des intégrales avec l'augmentation de l'ID a été trouvée (i.e. augmentation de la co-activation) avec un effet de l'ID plus prononcé avant le pic de vitesse.

*Tableau 32 : Tableau des résultats des test statistiques de l'effet de l'ID sur les différentes mesures de co-activation pour le couple brachio/rond-pronateur pour les deux référentiels.*

Variables pour Brachio/Rond-pronateur	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Kellis tout le mouvement	$X^2(4)=2.4, p=0.66$	$X^2(4)=15.35, p=0.004, 1/5, 2/3, 2/4, 2/5$
Kellis before PVe	$X^2(4)=1.40, p=0.842$	$X^2(4)=15.69, p=0.003, 1/5, 2/3, 2/4, 2/5$
Kellis after PVe	$X^2(4)=7.580, p=0.108$	$X^2(4)=14.74, p=0.005, 1/5, 2/3, 2/4, 2/5$
Ervilha tout le mouvement	$X^2(4)=3.619, p=0.460$	$X^2(4)=20.60, p=0.0003, 1/3, 1/5, 2/3, 2/4, 2/5$
Ervilha before PVe	$X^2(4)=2.323, p=0.676$	$F(4,80)=10.081, p=0.0003, 1/3, 1/4, 1/5, 2/5$
Ervilha after PVe	$X^2(4)=6.209, p=0.184$	$X^2(4)=23.80, p=8.72 \times 10^{-5}, 1/5, 2/3, 2/4, 2/5$
Diff int tout le mouvement	$X^2(4)=53.523, p=6.62 \times 10^{-11}$ sauf $3/4$ et $4/5$	$X^2(4)=44.95, p=4.06 \times 10^{-9},$ toutes les paires sauf $3/4$ .
Diff int before PVe	$X^2(4)=50.55, p=2.76 \times 10^{-10},$ sauf $3/4, 4/5$	$X^2(4)=65.63, p=1.88 \times 10^{-13},$ toutes sauf $3/4$
Diff int after PVe	$X^2(4)=33.67, p=8.68 \times 10^{-7},$ sauf $2/3, 2/4, 2/5, 3/4, 3/5, 4/5$ .	$X^2(4)=43.80, p=7.02 \times 10^{-9},$ $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$

En résumé, les résultats pour le couple brachio-radial/rond-pronateur montrent que :

- Pour le référentiel géocentré : Aucun effet de l'ID sur les indices d'Ervilha et Kellis. La différence des intégrales révèle une augmentation de la co-activation avec l'augmentation de l'ID préférentiellement avant le pic de vitesse.
- Pour le référentiel égocentré : Des effets de l'ID ont été observés sur l'ensemble des indices de co-activation.

### 3.4.3. Relation entre la charge mentale et l'EMG

Maintenant que nous avons vu comment évoluent les différentes mesures de co-activation avec l'augmentation de l'ID, nous allons étudier leur relation vis-à-vis du score « mental » du NASA-TLX.

#### 3.4.3.1. Couple Biceps/Triceps

Pour le référentiel géocentré, une corrélation négative faible a été trouvée entre les index de Kellis puis d'Ervilha avec le score « physique ». Une corrélation négative forte a été constatée entre les scores « global » et « mental » et la différence des intégrales (voir Tableau 33).

Pour le référentiel égocentré, des corrélations ont été observées uniquement avec la différence des intégrales. Une corrélation négative forte a été trouvée avec le score « mental », une corrélation négative moyenne avec le score « global » et une corrélation positive avec le score « physique ». Ce dernier signifie que lorsque la co-activation augmente le score « physique » diminue.

*Tableau 33 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps et le score « mental » pour les deux référentiels.*

Variables pour BT	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Kellis / Score global	$r=-0.06, p=0.541$	$r=-0.07, p=0.493$
Kellis / Score mental	$r=-0.07, p=0.497$	$r=0.127, p=0.246$
Kellis / Score physique	$r=-0.247, p=0.022$	$r=-0.150, p=0.1684$
Ervilha / Score global	$r=-0.009, p=0.93$	$r=0.013, p=0.90$
Ervilha / Score mental	$r=-0.003, p=0.972$	$r=0.196, p=0.07$
Ervilha / Score physique	$r=-0.252, p=0.019$	$r=-0.150, p=0.167$
Diff int / Score global	$r=-0.548, p=5.34^{-08}$	$r=-0.389, p=0.0002$
Diff int / Score mental	$r=-0.585, p=3.877^{-09}$	$r=-0.659, p=6.562^{-12}$
Diff int / Score physique	$r=-0.006, p=0.954$	$r=0.350, p=0.0010$

Ces résultats montrent pour le couple biceps/triceps :

- Pour le référentiel géocentré : Le score « physique » diminue quand la co-activation augmente lorsqu'on regarde les index de Kellis et d'Ervilha. Il existe une relation entre la différence des intégrales et les scores « global » et « mental ».
- Pour le référentiel égocentré : Il existe des relations uniquement avec la différence des intégrales pour les trois scores. Le score « physique » présente une relation positive comparé aux deux autres scores qui eux ont des relations négatives.

### 3.4.2.2. Couple Rond-pronateur/Brachio radial

Pour ce couple, des corrélations négatives existent pour les scores « global » et « mental » pour l'ensemble des index de co-activation pour les deux référentiels. Cependant, pour le référentiel égocentré le score « physique » présente une corrélation positive avec la différence des intégrales (voir Tableau 34).

*Tableau 34 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple brachio/rond-pronateur et le score « mental » pour les deux référentiels.*

Variables pour BRRP	Vitesse - Géocentré	Vitesse - Egocentré
Kellis / Score global	$r=-0.228, p=0.035$	$r=-0.236, p=0.029$
Kellis / Score mental	$r=-0.237, p=0.028$	$r=-0.353, p=0.00090$
Kellis / Score physique	$r=-0.162, p=0.136$	$r=-0.0059, p=0.589$
Ervilha / Score global	$r=-0.219, p=0.043$	$r=-0.273, p=0.0113$
Ervilha / Score mental	$r=-0.215, p=0.047$	$r=-0.391, p=0.00021$
Ervilha / Score physique	$r=-0.199, p=0.06$	$r=-0.084, p=0.440$
Diff int / Score global	$r=-0.508, p=6.91^{-07}$	$r=-0.241, p=0.0256$
Diff int / Score mental	$r=-0.587, p=3.39^{-09}$	$r=-0.524, p=2.55^{-07}$
Diff int / Score physique	$r=-0.008, p=0.939$	$r=0.395, p=0.0001$

Ces résultats montrent pour les deux référentiels, que lorsqu'on observe les index d'Ervilha et Kellis, les corrélations signifient que lorsque la co-activation augmentent les scores « global » et « mental » diminuent. Tandis que lorsque l'on analyse les corrélations pour la différence des intégrales, les scores « global » et « mental » augmentent lorsque la co-activation augmente. Ceci suggère que pour ce couple la méthode d'analyse musculaire est impactée dans ce mode de contrôle.

## 4. Discussion chapitre 3

Les résultats obtenus en mode de contrôle en vitesse montrent que la dynamique du mouvement de pointage présente des aspects cognitifs semblable à ceux trouvés dans le contrôle en position (chapitre 1).

On a pu mettre en évidence que les scores « global » et « mental » du NASA-TLX augmentait avec l'augmentation de la difficulté de la tâche pour les deux référentiels. Nos résultats montrent que l'augmentation de l'ID impacte majoritairement le score « mental » du NASA-TLX qui semble plus sensible au coût cognitif. Le mode de contrôle en vitesse semble présenter une sensibilité au coût cognitif.

Lorsque nous analysons nos résultats des métriques de performances et cinématiques, l'impact de l'ID est similaire sur la performance et la cinématique pour les deux référentiels. Cependant, les résultats observés suggèrent que le mouvement impliqué dans le contrôle en vitesse peut influencer la sensibilité de nos métriques de

cinématique à l'augmentation de l'ID. Le fait que le participant doit anticiper le pointage peut engendrer des modifications cinématiques et musculaires qui peut faire varier la sensibilité de nos métriques à l'ID. Un maintien de la performance dans l'espace de la tâche (i.e. nombre de portes validées) dans le référentiel égocentré a été obtenue. De façon purement observatoire, ce maintien semble comparable à celui obtenu avec le mode de contrôle en position. Afin d'affirmer statistiquement la présence de ce maintien de performance, des études qui comparent les deux référentiels pour un mode de contrôle permettrait d'explorer cette piste.

Ces expériences en mode de contrôle en vitesse ont permis d'explorer la présence de caractéristiques similaires de discrétisation du mouvement au niveau cinématique puis musculaire. En référentiel géocentré, pour les deux couples musculaires, un effet de l'augmentation de l'ID uniquement sur la différence des intégrales a été déterminé. Une corrélation négative entre le score « mental » et l'intégrale pour le couple biceps/triceps a été observée ainsi qu'une relation entre le score « physique » les index de co-activation de Kellis et d'Ervilha. Le couple brachioradial/rond-pronateur présente des relations entre les scores « global » et « mental » pour l'ensemble des index de co-activation. Cependant, nous avons constaté pour ce dernier couple, que les corrélations entre les scores « global » /« mental » et les index d'Ervilha/ Kellis montrent que lorsque le score augmente, la co-activation diminue. Or, nous retrouvons un résultat opposé lorsqu'on analyse la différence des intégrales pour ces deux mêmes scores. Ce résultat suggère que la méthodologie d'évaluation du niveau de co-activation peut être influencée par certains paramètres du mouvement. Dans notre tâche la vitesse du mouvement, les caractéristiques musculaires et biomécaniques des muscles peuvent expliquer les résultats opposés entre les différences mesures de la co-activation.

En référentiel égocentré, on retrouve une diminution de la différence des intégrales avec l'ID pour les deux couples musculaires. Pour le couple brachioradial/rond-pronateur, nous avons une augmentation des deux autres index de co-activation (Ervilha et Kellis) lorsque la difficulté de la tâche augmente. Plus précisément, nous retrouvons des relations entre les trois indices de co-activations et les scores « global » et « mental », et une relation entre le score « physique » et la différence des intégrales. Pour le couple biceps/triceps, nous avons des relations uniquement entre les trois scores et la différence des intégrales. Nous retrouvons des tendances similaires concernant les corrélations pour les deux référentiels.

Dans ce contexte de mode de contrôle en vitesse, la stratégie motrice impliquée par le SNM pour les deux couples musculaires ne semble pas être la même. Nous pouvons supposer que la vitesse du mouvement impliqué dans ce mode de contrôle (inhérente à la tâche de Fitts au travers des différentes difficultés) peut impacter ces résultats. Les caractéristiques des muscles, le type de méthodes d'évaluation de la co-activation et le type de traitement effectué peuvent grandement moduler les résultats de ces métriques dans ce mode. Les caractères polyarticulés des muscles ainsi que l'impact postural peuvent influencer le mouvement et par conséquent les activations musculaires. Ainsi, l'interprétation de nos résultats est actuellement limitée. Il semble intéressant d'envisager de nouvelles analyses en prenant en compte dans un premier temps le délai électromécanique pour vérifier que les résultats actuels ne sont pas représentatifs d'un décalage dû à la latence entre la commande motrice envoyée au muscle et le mouvement effectué.

Pour résumer ce chapitre 3, le passage d'un mode de contrôle en vitesse pour les deux référentiels induit des performances et une cinématique modifiée avec l'augmentation de l'ID. Au niveau musculaire, une modulation de la stratégie de co-activation semble être mise en place lors de la discrétisation du mouvement avec l'augmentation de la charge cognitive. Cette modulation d'activité musculaire peut s'expliquer par notamment la nature des muscles impliqués dans le mouvement et les limites méthodologiques des analyses actuelles.

Ce mode de contrôle en vitesse implique que le mouvement est en impulsion ce qui demande d'anticiper le mouvement avec plus de corrections motrices pour exécuter la tâche. La stratégie motrice impliquée lors de l'augmentation de la difficulté de la tâche semble similaire à celle observé pour un mode de contrôle en position. Cette stratégie motrice est une discrétisation du mouvement lors de l'augmentation de l'ID.

Des études et recherches spécifiques pourrait être réalisées afin de mieux comprendre les différences qu'implique ce type de changement de mode de contrôle sur l'ensemble des métriques et sur leurs relations. Nos analyses montrent qu'il existe un maintien de la performance de la tâche dans le référentiel égo-centré. Il semble pertinent de faire des études complémentaires pour confirmer le maintien de cette performance par rapport au référentiel géocentré et ce pour chaque mode de contrôle. Ce chapitre nous a permis d'observer la présence de sensibilités du score « mental » à la charge cognitive pour les deux référentiels. Le score « global » a à nouveau présenter une certaine similitude avec le score « mental ». Une étude plus approfondie des pondérations du NASA-TLX pourrait permettre de mettre en lumière si ces similitudes sont dû majoritaire à la dimension Exigence Mental (représentatif ici de notre score « mental »).

L'effet de la difficulté sur nos métriques et leurs relations à la charge cognitive dans un mode de contrôle en vitesse a été exploré durant chapitre. Maintenant, nous allons observer nos métriques et leur relation à la charge cognitive dans un contexte écologique de vol d'hélicoptère.

## CHAPITRE 4 : Exploration du comportement des métriques de charge de travail et des métriques de coordinations motrices dans un cas écologique de vol en hélicoptère

L'objectif de l'expérimentation en vol présentée dans ce chapitre consiste à évaluer la robustesse de nos métriques de quantification du coût cognitif en conditions réelles de pilotage d'hélicoptère. Cette expérimentation s'est déroulée dans le cadre d'essais en vol réalisés avec la DGA-EV.

### 1. Matériel et méthodes

#### 1.1. Participants

Deux pilotes d'essais hommes âgés de 46 ans +/- 4 ans, avec un nombre d'heures de vol de 4400 h +/- 600. Ils sont pilotes d'essais depuis 10 ans +/- 2. Les critères d'exclusions sont : les problèmes visuels, les problèmes neuromusculaires et les pathologies ayant un effet direct/indirect sur l'action sensori-motrice. Suivant la déclaration d'Helsinki, toutes les procédures ont été réalisées après l'acceptation par les pilotes, le chef de la navigation de la DGA-EV ainsi que du responsable de la sécurité des vols de participer à l'étude. Les données acquises ont été pseudo-anonymisées.

#### 1.2. Protocole

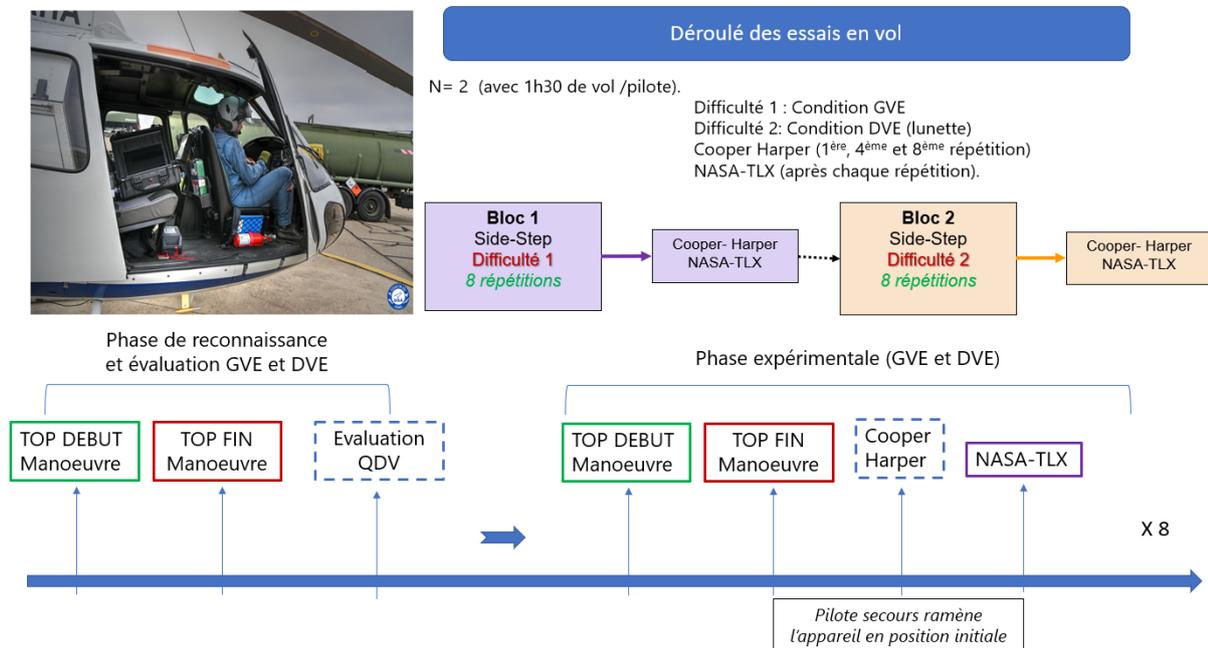


Figure 44 : Schéma du déroulement du protocole des essais en vol.

Les pilotes ont effectué une manœuvre de Side-step. Cette manœuvre consiste à partir d'une position de stationnaire sur la base de droite, incliner l'hélicoptère et partir sur la base gauche. Puis, il faut maintenir un stationnaire de 5 secondes et revenir à la base de droite. Cette manœuvre est agressive, elle pourrait s'apparenter à un hélicoptère caché

derrière un bâtiment qui va sortir viser sa cible puis revenir derrière le bâtiment (pour plus de détails voir dans l'annexe PARTIE 5).

Dans ce protocole nous avons deux difficultés (voir Figure 44 et Tableau 40) :

- Une difficulté facile dite de Good Visual Environnement noté GVE. Cette condition correspond aux conditions normales de vol sans contraintes.
- Une difficulté difficile dite Degraded Visual Environnement noté DVE. Cette condition implique que le pilote porte des lunettes qui diminuaient le champ visuel et dégradaient la visibilité de l'environnement.

Le protocole d'essai était le suivant (voir Figure 43 et Tableau 35) :

Le protocole débute par une phase de familiarisation où chaque pilote va évaluer la configuration DVE. Cette évaluation permet de noter l'appréciation propre du pilote par rapport aux conditions météorologiques du vol et de vérifier que la dégradation visuelle ne met pas en danger le pilote durant le vol.

Ensuite, il va réaliser une répétition de la manœuvre de Side Step pour chacune des conditions GVE et DVE pour appréhender les performances à atteindre pour valider les manœuvres. Ces performances sont notées par le conducteur d'essai.

Dans la phase expérimentale, le pilote devait exécuter huit répétitions en condition GVE et huit répétitions en condition DVE. Le premier pilote devait effectué les essais en GVE puis DVE et le second pilote devait effectué les vols dans l'ordre inverse DVE puis GVE.

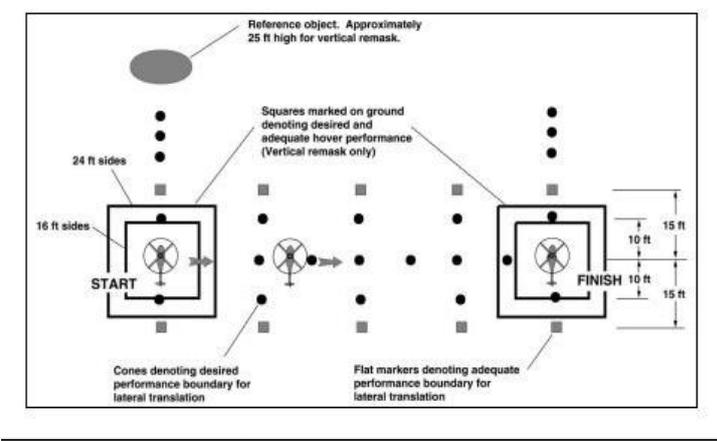
Pour chaque répétition, le pilote devait faire la manœuvre dans la difficulté demandée, puis répondre à un questionnaire NASA-TLX après chaque répétition. Il devait répondre à un questionnaire Cooper Harper à l'oral pour les essais n°1, 4 et 8. Durant la phase de réponses aux questionnaires par le pilote, le pilote de secours remettait l'appareil en position initiale (i.e. sur la cible de droite).

Au début de chaque manœuvre, le pilote lance le top de départ et le conducteur d'essai lance le chronomètre, tandis que l'ingénieur démarre sur l'ordinateur annexe pour l'acquisition des capteurs qui sont sur le pilote puis il indique le trigger de début de manœuvre dans l'ordinateur de bord de l'hélicoptère.

Lorsque le conducteur d'essai indique le stop de fin de manœuvre, le conducteur d'essai coupe le chronomètre et l'ingénieur arrête l'acquisition et se prépare à écrire les résultats du questionnaires NASA-TLX. Le conducteur d'essai note les résultats du questionnaire ainsi que l'ingénieur pour le NASA-TLX.

Le même protocole a été fait pour la manœuvre de Lateral repositionning (voir Annexe) mais nous ne les traiterons pas dans le cadre de la thèse.

Tableau 35 : Tableau contenant la manœuvre de Side Steps, les difficultés et le nombre de répétitions effectué.

<p><u>Manœuvre</u></p>	<p style="text-align: center;"><u>Side Steps</u></p> 
<p><u>Gestion difficulté</u></p>	<p style="text-align: center;"><i>Condition GVE</i> (Good Visual Environment) Vs <i>Condition DVE</i> (Degraded Visual Environment)</p>
<p><u>Nombre répétition par difficulté</u></p>	<p style="text-align: center;">8</p>

Avant chaque vol un débriefing a eu lieu avec l'ensemble de l'équipage pour faire un rappel du déroulement du vol, les performances à atteindre sur chacune des manœuvres et les procédures de sécurité.

Un rappel sur les mesures du NASA-TLX a également était fait afin d'être sûr que chacun des pilotes ait les définitions de chacun des termes à évaluer. Pour des raisons de timing, de praticité et sécurité, les différents scores du NASA-TLX étaient donnés à l'oral le score entre 0 et 100 après que les termes suivants soient énoncés : « mental », « physique », « temporelle », « performance », « effort », « frustration ».

Après le vol, les pilotes remplissaient la feuille des pondérations entre les dimensions du NASA-TLX. Il y plusieurs paires entre les dimensions par exemple « effort/physique » et le pilote doit choisir quel facteur a été le plus important pour lui pour réaliser la tâche. Cette pondération sert ensuite dans le calcul du score global du NASA-TLX en donnant plus de poids aux dimensions préférentielles du pilote (voir ANNEXE- Partie 1).

### 1.3. Matériels utilisés pour les essais sur les pilotes

Les pilotes d'essais ont été équipé :

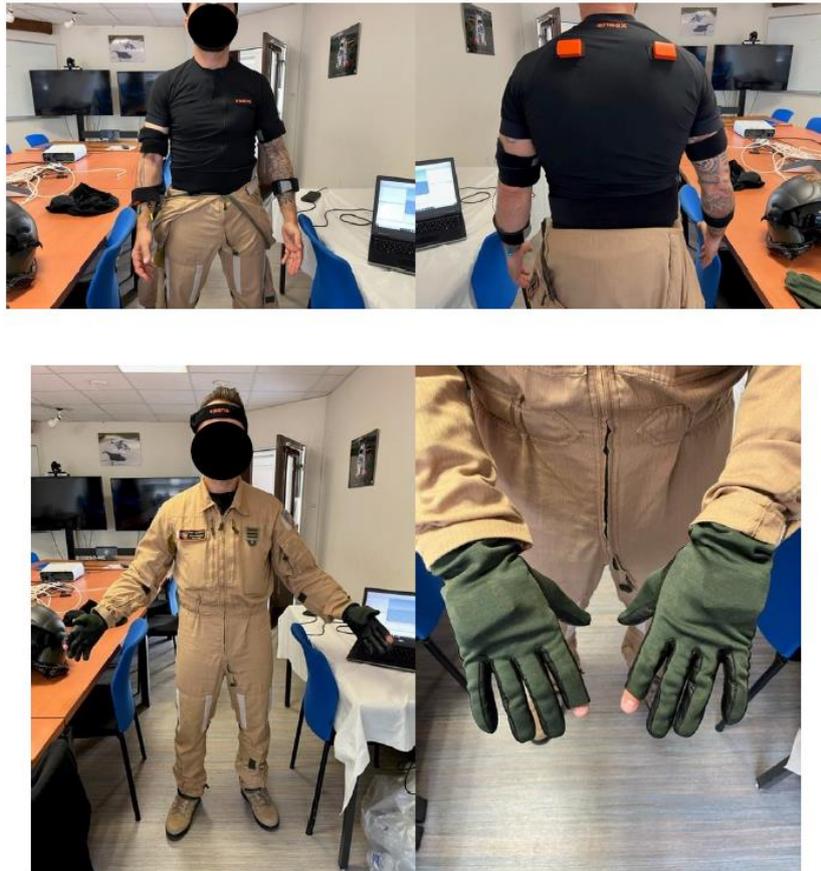
- De capteurs EMG au niveau des deux couples musculaires d'intérêt (biceps/triceps ; muscle brachioradial/muscle rond pronateur),
- Des IMU respectivement sur le centre des mains, le centre du radius (des deux avant-bras), le centre de l'humérus (des deux bras), les trapèzes, le sternum.

Les activités électromyographiques et cinématiques ont été enregistrées de façon synchrone à une fréquence d'acquisition de 1000Hz. La pose des capteurs EMG a été faite selon les recommandations de la SENIAM. La peau de chaque pilote a été nettoyée et rasée à l'endroit où était positionnée chaque électrode. Les capteurs n'empêchent pas les pilotes de remettre leurs habits ignifugés ainsi que leurs combinaisons de vol après appareillage.

Pour l'acquisition des données GPS de l'hélicoptère et de sa cinématique, les données ont été acquises directement au travers de l'installation d'essais en vol présente dans l'hélicoptère (déjà intégré à l'hélicoptère) ainsi que les positions des commandes de vol (palonnier, manche cyclique et le collectif). Un GPS DG14 a été utilisé dont les données représentent la position de l'antenne sans correction et la fréquence d'enregistrement était de 10Hz. Les données de la commande de vol correspondant au cyclique ont été enregistrées à une fréquence de 16 Hz.

Les données GPS ont permis de récupérer la cinématique de l'appareil. Les enregistrements audios des vols ont été récupérés ainsi que les tops utilisés dans le fichiers acquis dans le système de l'hélicoptère pour les indications de début et fin d'essai. Parallèlement, les mêmes triggers ont été définis au sein du logiciel d'acquisition EMG/XSENS.

Nous avons pris soin préalablement de synchroniser notre ordinateur d'acquisition en intégrant un protocole Network Time Protocol (NTP) permettant de faire une synchronisation de la date et de l'horloge de l'ordinateur portable à un serveur local. Nous avons vérifié le delta entre le temps système de notre pc et du système embarqué intégré à l'hélicoptère. Ceci a permis d'avoir une « synchronisation » entre les acquisitions faites sur notre ordinateur, les données GPS de l'hélicoptère, les autres données de l'hélicoptère et de l'ordinateur de bord.



*Figure 45 : Photographies du pilote équipé de l'ensemble des dispositifs utilisés pour l'acquisition du mouvement.*

Pour enregistrer les mouvements du bras droit, 11 centrales inertielles ont été placées sur l'ensemble du haut du corps du pilote (voir Figure 45) :

- Une sur chaque dos des mains (2)
- Une sur chaque avant-bras (2)
- Une par bras (2)
- Deux au niveau des omoplates (2)
- Une au niveau du sternum (1)
- Une au niveau des lombaires (1)
- Un au niveau de la tête (1)

Des électrodes EMG Delsys ont été placées sur le biceps, triceps, rond pronateur et muscle brachio-radial grâce au modèle duo d'EMG portatif Delsys.

Dans le cadre de ce manuscrit, la partie électromyographique n'a pas été traitée. Pour plus de détails concernant la préparation, le matériel utilisé pour ces essais, il faut se référer à la section de l'Annexe PARTIE 5.

## 2. Métriques et analyses

Durant ces essais en vol, la variable difficulté de la tâche (i.e. ID) a été manipulée représentée par les 2 niveaux de difficulté GVE (condition facile) et DVE (condition difficile).

Les variables dépendantes recueillies sont listées dans le Tableau 36. Toutes nos variables ont été traitées et analysées comme décrit dans la partie Méthodologie générale.

Ces analyses ont été traitées comme un Fitts discret puisque le mouvement entre l'aller et le retour est interrompu par une phase de stationnaire.

Le temps de mouvement et le pic de vitesse ont été calculés dans l'espace effecteur et dans l'espace de la tâche.

- L'espace de la tâche est défini ici comme l'environnement hélicoptère. Les mesures analysées dans l'espace de la tâche ont été calculées à partir des déplacements de l'hélicoptère sur les coordonnées cartésiennes en latéral obtenues après projection des coordonnées GPS.
- L'espace effecteur est défini comme le bras du pilote. Les mesures analysées dans l'espace effecteur ont été calculées à partir des déplacements du manche cyclique sur l'axe médio-latéral uniquement (i.e. l'axe de roulis).

Dans ces essais en vol, la représentation du portrait de Hooke a été ajoutée. Ce portrait représente l'accélération en fonction de position normalisée entre -1 et 1.

A noter que le résultat du DIMSS-PM est la valeur du DIMSSPM moyen alors dans les chapitres précédents nous avons utilisé la valeur du DIMSS-PM médian. Ce choix a été fait car le faible de nombre de participant ne permettait pas d'avoir une valeur médiane interprétable.

Également, l'échelle d'évaluation de Cooper-Harper a été intégrée à ce chapitre (Cooper et al 1969). C'est une échelle subjective qui permet aux pilotes d'essai (ou ingénieurs d'essai en vol) d'évaluer les qualités de maniabilité des aéronefs notamment pour la certification des appareils. Elle est utilisée dans le cadre de tâches au cours d'un essai en vol et s'applique à des manœuvres spécifiques codifiées en performances et en temps. Cette échelle n'est pas utilisable dans le cadre de vol non standardisé. Elle est basée sur un système de notation entre 1 et 10. La note du HQR représente la note de classement des qualités de maniabilité de l'aéronef, plus la note est basse plus les critères de maniabilité sont bons et plus la note augmente moins les critères de maniabilité sont bons.

Aucune valeur moyenne n'a été donnée pour le HCQ du Cooper-Harper, car ce moyennage ne donne plus de sens au résultat par rapport aux scores du questionnaire NASA-TLX.

*Tableau 36 : Tableau représentant les variables dépendantes pour les essais en vol suivis d'un tableau des variables dépendantes des essais en vol.*

Catégorie de variables	Nom de la variable dépendante
Cinématique	<i>Temps de mouvement (TMt TMe) Position du pic de vitesse (PVt PVe) DIMSS-PM Portrait de phase</i>
Questionnaire NASA-TLX	<i>Score global / Score mental /Score physique</i>
Echelle d'évaluation de Cooper-Harper	<i>Score HQR</i>
Espace de la tâche	Espace effecteur
<i>Temps de mouvement (TMt) Position du pic de vitesse (PVt) Portrait de phase Portrait de Hooke</i>	<i>Temps de mouvement (TMe) Position du pic de vitesse (PVe) DIMSS-PM</i>

## 2.1. Préparation des données et analyses

Nous avons à partir des données GPS de l'hélicoptère et des TOP enregistrés, projeté les coordonnées GPS dans une projection conique conforme de Lambert 93. Ceci a permis de replacer les coordonnées sur le site de vol via une projection plane avec des distances métriques.

Nous avons ensuite visualisé les vols, une estimation le centre des cibles du terrain d'ADS-33 a été faite à partir des phases de stationnaire des fins de manœuvres de la MTE Lateral Repositioning. Cette manœuvre demande de façon intrinsèque une précision latérale concernant la présence de l'hélicoptère dans les cibles. Une moyenne des positions stationnaires de fin de manœuvre a été calculée pour définir le centre des cibles de taille soit désirée de 10 ft<sup>7</sup> sur 10 ft soit adéquate de 30 ft sur 30 ft.

Ensuite, la distance entre le milieu des deux cibles a été calculée, ce qui représente 120m soit 127.5m de l'ADS-33 moins la demi-taille d'une cible x 2. Le centre de la droite entre les deux centres des cibles a été déterminé i.e. le point C médian de la distance parcourue. Ce point sera utilisé comme centre du repère cartésien dans lequel nous allons positionner les vols. Les points de la projection conique conforme de Lambert 93 ont été transposés dans un repère cartésien où le point C correspondra à l'origine du repère et l'axe X de ce repère représentera la perpendiculaire à l'axe passant par le centre des deux cibles (ainsi la translation ne s'effectuera que suivant l'axe Y de notre repère cartésien).

<sup>7</sup> ft : unité de mesure de longueur représentant le symbole du pied, 1ft = 0,3048 mètre.

Nous obtenons de cette façon des vols avec des coordonnées cartésiennes avec 60m à droite pour le milieu de la cible de droite et -60m à gauche pour le milieu de la cible de gauche.

La projection conique conforme Lambert 93 (EPSG 9794) basée sur le système géodésique RGF93 v2b (EPSG 9782) est la projection officielle des cartes en France métropolitaine depuis le 26 décembre 2000. Elle est bidimensionnelle et elle se présente sous forme de coordonnées Nord et Est translattées de 660000 unités de mesure en Nord et 700000 unités de mesure en Est. L'ellipsoïde de référence utilisé est l'IAG GRS80 (EPSG 7019). Le méridien central de la projection est 3° Est et la latitude d'origine est 46°30' Nord.

A partir des vols en coordonnées cartésiennes, le découpage de chaque manœuvre (Side-Step et Lateral Repositionning) a été réalisé de sorte à traiter l'ensemble des manœuvres comme un ensemble de tâches de pointage en Fitts discret. Pour cela les Side-Step ont été coupés en deux parties (un pointage vers la gauche et un pointage vers la droite). Afin de considérer uniquement les phases de mouvement au manche du pilote nous avons découpé l'ensemble des phases de stationnaires intermédiaires et finales, autant dans les Side-step que dans les Lateral Repositionning.

Les Side-step ont d'abord été coupés en deux manœuvres unitaires en utilisant le déplacement maximal suivant l'axe latéral comme critère de découpage. Pour enlever les stationnaires, le roulis de l'appareil a été utilisé comme critère, puisque la mise en roulis dans la direction opposée au déplacement latéral est la manœuvre classique de freinage et mise en stationnaire d'un hélicoptère. Ainsi pour les déplacements de droite à gauche, nous avons cherché le roulis maximal qui correspond donc au freinage maximal de l'appareil. A partir de ce point une recherche des minima locaux sur le roulis a été effectuée. Le premier minima local inférieur à 10° de roulis a été choisi pour déterminer la fin du mouvement de pointage. Ce minima a été choisi afin d'éliminer les micro-corrrections pouvant être effectuées par le pilote dans la phase de correction d'assiette.

Pour les mouvements de gauche à droite la stationnaire initial a été coupé en cherchant le maximum de roulis (correspondant donc au début du déplacement latéral de l'appareil) puis en prenant le dernier minimum local de roulis inférieur à 10° précédant ce maximum. La découpe du stationnaire final se fait de la même façon que pour les vols de droite à gauche, on cherche d'abord le minimum global de roulis (freinage maximal du mouvement latéral) et puis le premier maximum local supérieur à -10° de roulis (début de la phase de mise en stationnaire)(voir Figure 46).

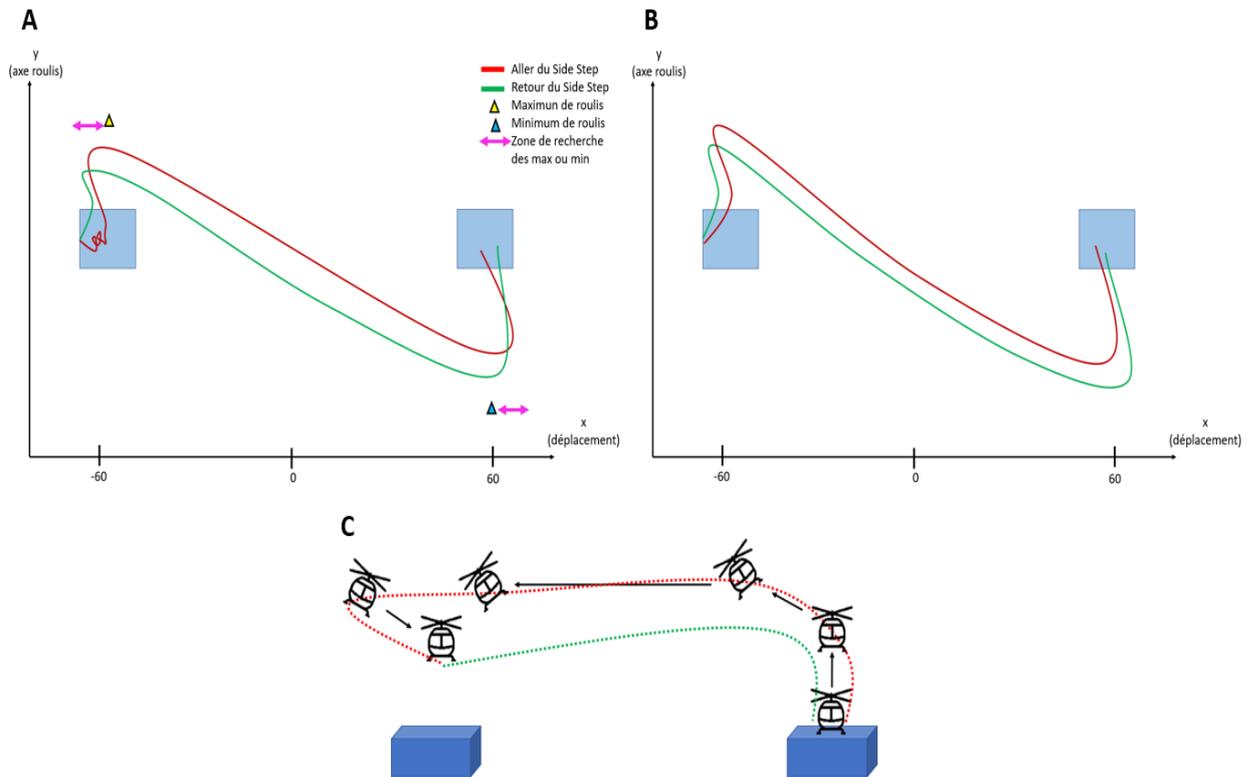


Figure 46 : Schéma du découpage des demi-cycle de la manœuvre de Side-Step.

### 3. Hypothèses

Nous espérons retrouver des similitudes de comportement entre nos différences métriques et les résultats obtenus en laboratoire présentés dans le chapitre 3.

Nous espérons observer concernant les hypothèses d'impact de l'augmentation de la difficulté de la tâche sur nos différentes métriques :

- Une augmentation de la charge de travail avec l'augmentation de la difficulté de la manœuvre avec une plus grande sensibilité pour le score « mental »,
- Une diminution du DIMSS-PM,
- Une modification de la stratégie motrice (cinématique),

Concernant notre deuxième hypothèse qui visait à définir la relation entre la mesure subjective de la charge de travail et nos différentes métriques du mouvement avec l'augmentation de la difficulté de la tâche. Nous ne pouvons pas faire de corrélation au vu du faible nombre de pilotes étudiés.

## 4. Résultats des essais en vol

### 4.1. Résultats sur la charge de travail : questionnaire NASA-TLX.

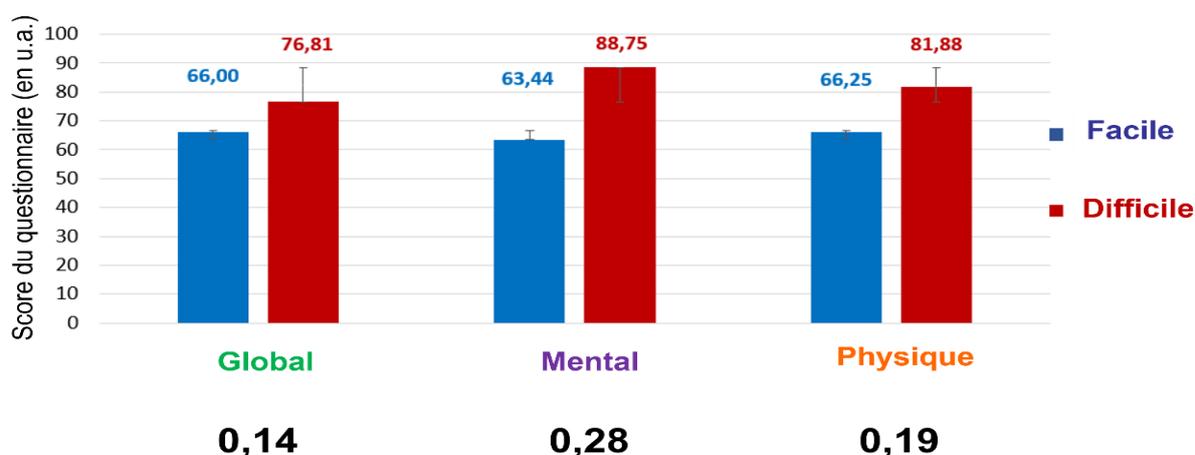
Dans cette expérience, nous avons fait l'hypothèse que la charge cognitive augmentait avec l'augmentation de l'ID i.e. une augmentation du score NASA-TLX.

La moyenne des différents scores du NASA-TLX augmente en condition DVE par rapport à la condition GVE et de façon plus prononcée pour le score « mental ». En effet, nous avons constaté que les résultats du score « global » sont inférieurs au score « physique », eux-mêmes inférieurs au score « mental », cette constatation a pu être faite à partir du calcul des écarts relatifs (voir Figure 47 et Tableau 37).

*Tableau 37 : Tableau des résultats des différents scores du NASA-TLX pour chaque difficulté par pilote et les scores moyens.*

Variables	P1 GVE	P1 DVE
Score Global	59.75	78.17
Score Mental	53	90
Score Physique	58	81
Variables	P2 GVE	P2 DVE
Score Global	72.25	75.46
Score Mental	74	88
Score Physique	75	83
Variables	GVE moyenne	DVE moyenne
Score Global	66	76.815
Score Mental	63.5	89
Score Physique	66.5	82

Score du NASA-TLX du type de score et de la difficulté de la manœuvre



*Figure 47 : Graphiques de scores moyen du NASA-TLX de la manœuvre de Side-step et en noir les valeurs de l'écart relatif entre les deux difficultés pour les deux pilotes.*

Ce résultat montre que les différents scores du NASA-TLX semblent sensibles à l'augmentation de la difficulté avec une plus grande sensibilité pour le score « mental » puisque c'est le score qui montre la plus grande différence entre les deux difficultés.

#### 4.2. Résultats de la charge de travail : DIMSS-PM

Dans cette expérience, l'hypothèse était que la charge cognitive augmente avec l'augmentation de l'ID i.e. une diminution des valeurs du DIMSS-PM.

Une diminution du DIMSS-PM avec l'augmentation de l'ID pour les deux pilotes a été observée (voir Figure 48 et Tableau 38).

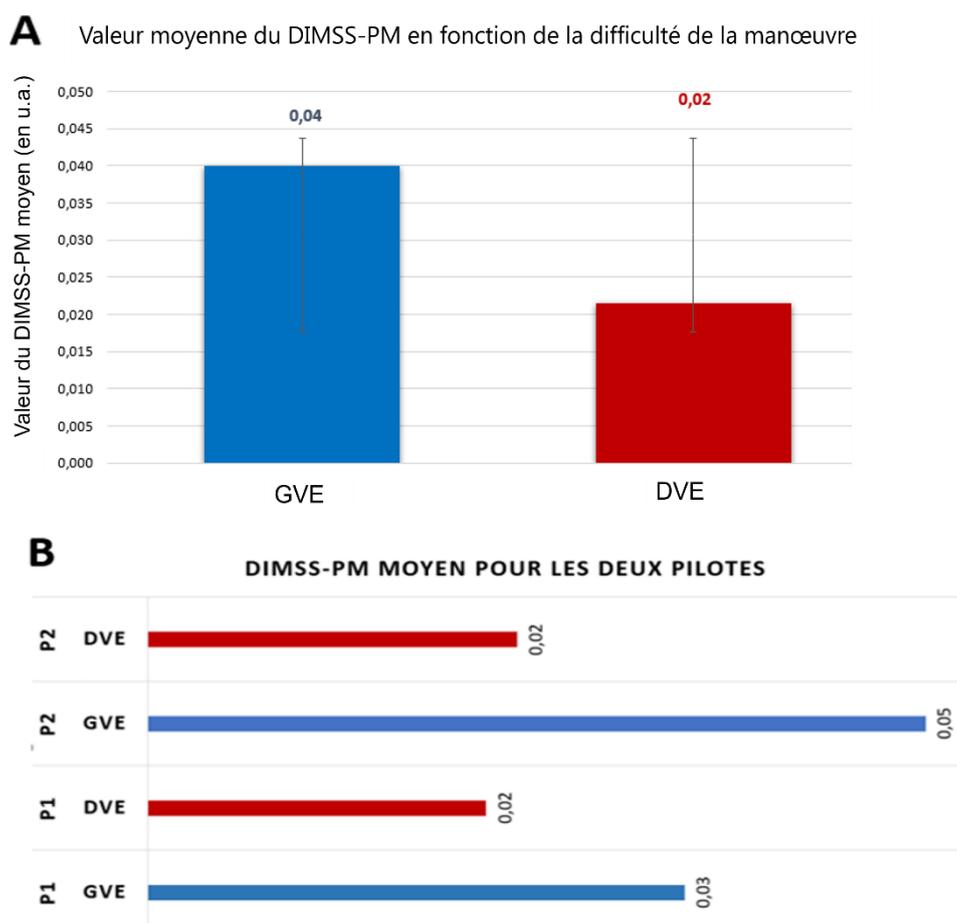


Figure 48 : (A) Graphique des valeurs moyennes du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement.

Tableau 38 : Tableau des valeurs du DIMSS-PM pour chaque pilote puis la moyenne des deux.

Variables	GVE	DVE
DIMSS-PM P1	0,032	0,020
DIMSS-PM P2	0,047	0,022
MOYENNE DIMSS-PM	0,039	0,021

Ce résultat semble montrer une diminution de la charge de travail avec l'augmentation de l'ID ce qui est en contradiction avec les résultats des réponses subjectives des participants.

#### 4.3. Résultats de la charge de travail : questionnaire Cooper-Harper

Les HQC retranscrits par le Cooper-Harper montrent une augmentation de la charge de travail au fur et à mesure des répétitions en condition GVE alors que le HQC ne semble pas augmenter en condition DVE. La note HQC augmente avec l'augmentation de la difficulté (i.e. entre GVE et DVE) pour les répétitions 1 et 4. Alors que pour la répétition 8, le score semble plus être influencé par la difficulté de la manœuvre (voir Tableau 39).

*Tableau 39 : Tableau des valeurs du Cooper-Harper pour chaque pilote lors des 3 évaluations.*

Note HQC	1 <sup>er</sup> répétition	4 <sup>ème</sup> répétition	8 <sup>ème</sup> répétition
GVE P1	4	6	7
DVE P1	6	6	6
GVE P2	5	5	6
DVE P2	7	7	6

#### 4.4. Stratégie motrice : performance de la tâche et performance de la cinématique du mouvement.

Maintenant que les métriques de charge de travail ont été analysées, nous allons analyser les métriques de performance du mouvement. Dans cette expérience, nous faisons l'hypothèse que la performance diminue et/ou se dégrade avec l'augmentation de l'ID.

Dans un premier temps, les résultats concernant l'effet de l'ID sur la performance de la tâche dans les deux difficultés ont été étudiés.

Les résultats concernant la performance cinématique du mouvement ont été analysés pour permettre de vérifier la validité du paradigme utilisé de la loi de Fitts.

Une augmentation du temps de mouvement pour les deux espaces T<sub>Mt</sub> et T<sub>Me</sub> a été constatée pour chaque pilote. Une dégradation de la performance dans l'espace de la tâche et dans l'espace de l'effecteur a été remarquée (voir Figure 49 et Tableau 40).

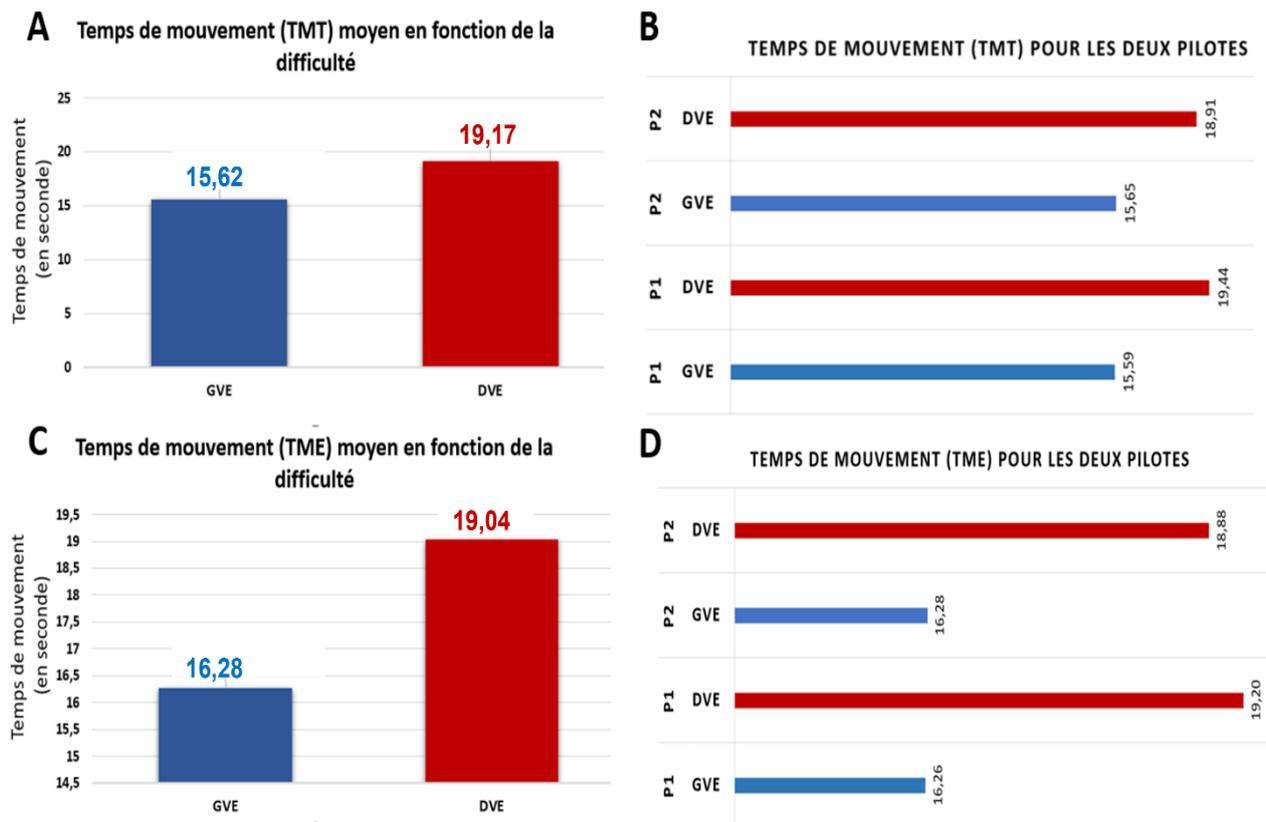


Figure 49 : (A) Graphique des valeurs moyennes du TMT en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du TMT en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement. (C) Graphique des valeurs moyennes du TME en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement et (D) Graphique des valeurs du TME en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement.

Tableau 40 : Tableau des valeurs du TMT et du TME pour chaque pilote puis la moyenne pour les deux.

Variables	GVE	DVE
Temps de mouvement TMT P1	15,58	19,43
Temps de mouvement TMT P2	15,64	18,91
TMT moyen	15,61	19,17
Temps de mouvement TME P1	16,26	19,19
Temps de mouvement TME P2	16,27	18,88
TME moyen	16,27	19,03

Ces résultats semblent montrer que la performance diminue avec l'augmentation de l'ID.

4.5. Stratégie motrice : cinématique du mouvement

Dans cette expérience, nous faisons l'hypothèse que la cinématique du mouvement se modifie avec l'augmentation de l'ID i.e. des modifications cinématiques

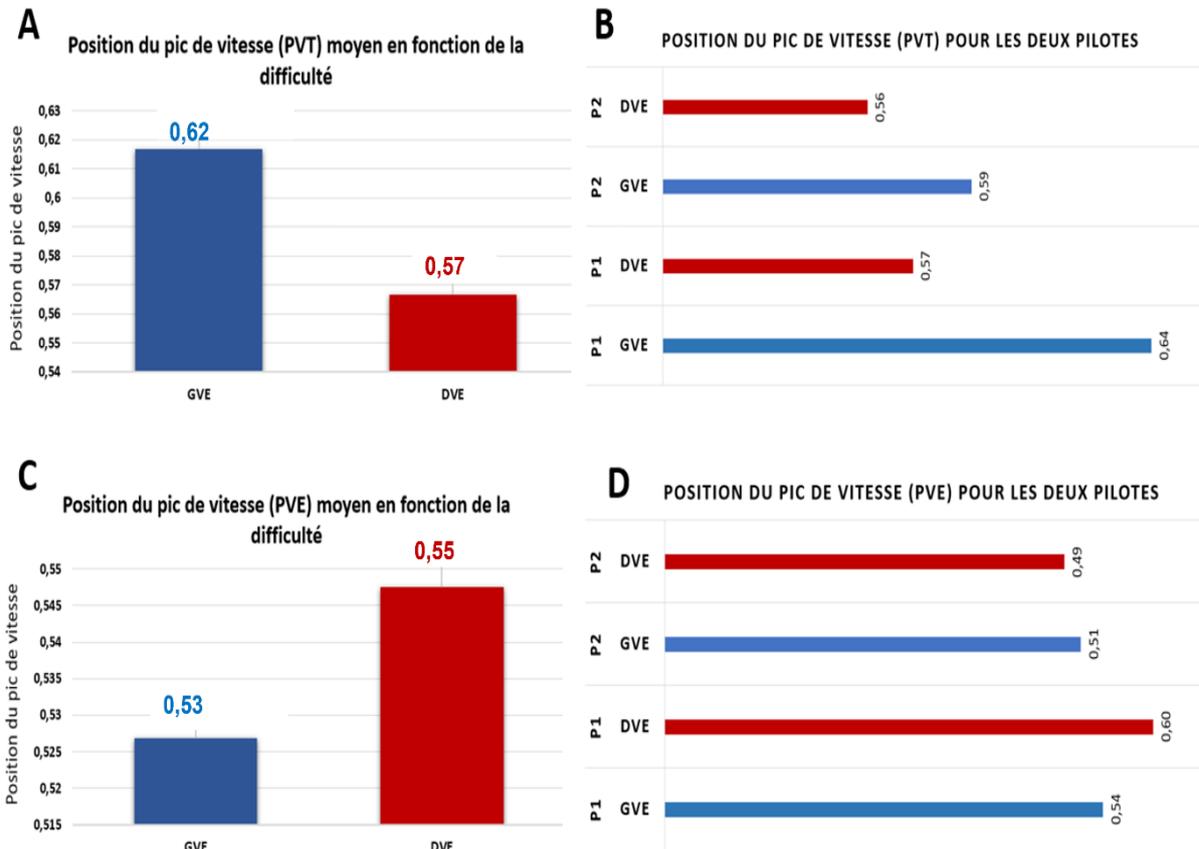


Figure 50 : (A) Graphique des valeurs moyennes du PVT en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du PVT en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement. (C) Graphique des valeurs moyennes du PVE en fonction de la difficulté de la manœuvre, (D) Graphique des valeurs du PVE en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement.

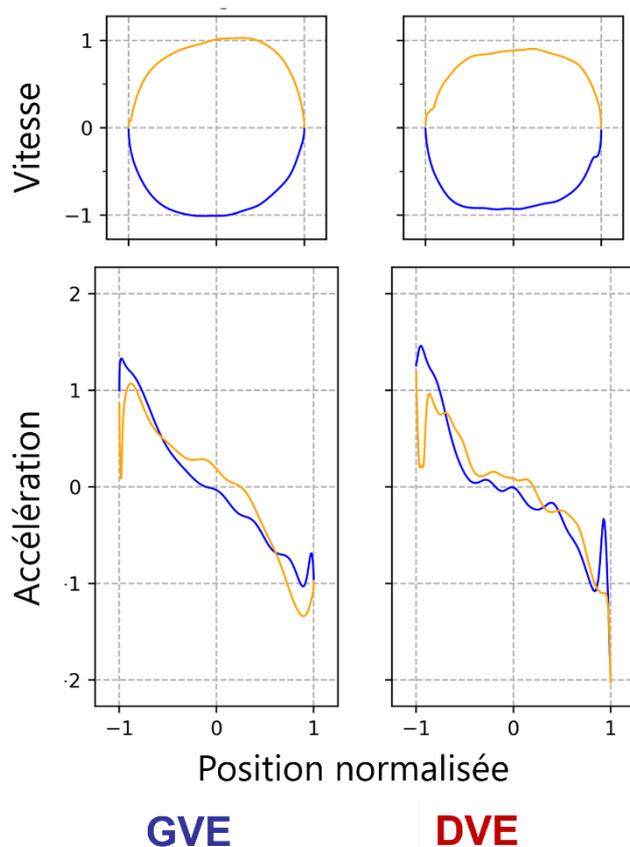
Tableau 41 : Tableau des valeurs du PVT et du PVE pour chaque pilote puis la moyenne pour les deux.

Variables	GVE	DVE
Position du pic de vitesse PVt P1	0,64	0,57
Position du pic de vitesse PVt P2	0,59	0,55
PVt moyen	0,61	0,56
Position du pic de vitesse PVe P1	0,54	0,60
Position du pic de vitesse PVe P2	0,51	0,49
PVe moyen	0,52	0,54

Comme pour l'étude de laboratoire en mode de contrôle en vitesse, un décalage du pic de vitesse a été observée dans l'espace de la tâche (voir Figure 50 et Tableau 41). Dans l'espace effecteur, les résultats différents des deux pilotes ne nous permettent pas de prétendre à une tendance

Ce résultat montre que dans l'espace de la tâche que le décalage du pic de vitesse a été retrouvé au niveau de la cinématique synonyme de la modification de la cinématique du mouvement lorsque la difficulté augmente. Concernant, l'espace effecteur il semble que des coordinations motrices différentes permettent d'aboutir à des cinématiques appareils semblables.

### Plan de phase et portrait de Hooke moyen pour les deux pilotes



*Figure 51 : (A) Portraits de phase pour la condition GVE (noté ID=0) et pour la condition DVE (noté ID=1) et (B) les portraits de Hooke pour la condition GVE (noté ID=0) et pour la condition DVE (noté ID=1). Ces graphiques sont réalisés à partir du TMT uniquement.*

De façon spécifique, le portrait de phase et le portrait de Hooke présentent plus de variations en DVE, même si la forme semble similaire entre les deux portraits. Ceci se voit de façon plus nette sur les portraits de Hooke, où nous voyons une linéarité du mouvement plus dégradée en condition DVE par rapport à la condition GVE. Ainsi, ce résultat suggère que la cinématique s'est modifiée entre les deux difficultés avec une

présence plus prononcée de non-linéarité dans le mouvement lorsque la manœuvre est plus difficile (voir Figure 51).

#### 4.6. Relation entre la charge de travail, la performance et la cinématique avec l'augmentation de l'ID

Maintenant que nous avons vu comment évoluent les deux mesures de charge de travail, les mesures de performances et les mesures du mouvement avec l'augmentation de l'ID, nous allons observer leurs relations.

Les scores du questionnaire du NASA-TLX, la performance (dans l'espace de la tâche et dans l'espace de l'effecteur) et la cinématique du mouvement évoluent de façon similaire à l'augmentation de la difficulté de la manœuvre. En effet, une diminution de la performance, une modification du mouvement ont été observées et ces résultats semblent tendre vers une augmentation de la charge de travail avec une augmentation du score « mental ». Ces relations peuvent suggérer la capacité de nos mesures à évaluer la charge cognitive dans un cas de vol réel.

Concernant le DIMSS-PM, il semble diminuer avec l'augmentation de la difficulté pour les deux pilotes ce qui est opposé à l'impact de la difficulté pour nos autres mesures. A l'instar des travaux réalisés en laboratoire, ce résultat peut suggérer que cette mesure ne semble pas adapter pour quantifier la charge cognitive inhérente à l'exigence informationnelle qui caractérise la tâche effectuée en vol réel. Cependant, le faible échantillon ne permet pas de voir une diminution franche.

### 5. Discussion chapitre 4

Nos résultats permettent d'aller dans le sens d'une validation de nos hypothèses. Les mêmes tendances ont été retrouvées que lors de nos expériences de laboratoire en mode de contrôle en vitesse (cf. Chapitre 3). De plus, il semble y avoir une plus grande augmentation du score « mental » du NASA-TLX entre les deux conditions de difficulté de vol en termes d'écart relatif ce qui peut indiquer que la dimension mentale est plus impactée lors du changement de difficulté de la manœuvre que les deux autres dimensions. Autrement dit, nous pouvons penser que le coût cognitif augmente lorsque la difficulté augmente puisque la dimension mentale du questionnaire montre une augmentation. Toutefois, il faut noter que le score « physique » augmente entre les deux difficultés de manœuvre. Cette augmentation du score « physique » amène la question de l'effort physique présent lors de vrai vol. Les résultats EMG n'ont pas montré de tendance franche ce qui pose la question de la conséquence d'être en vol réel sur l'activité musculaire. Dans ce type de condition, la position du bras du pilote n'est pas la même que lors des expériences de laboratoire et les contraintes musculaires que le pilote subit par le vol peut impliquer des activités musculaires hors de la phase d'exécution de la tâche qui sont différentes (vibration de l'hélicoptère, stabilisation du corps par rapport à l'inclinaison de l'aéronef).

Les métriques de performance du mouvement et de cinématique sont en accord avec le score « mental », ce qui en font de bons candidats pour évaluer la charge cognitive en vol réel.

Nos résultats semblent suggérer une absence de sensibilité du DIMSS-PM à la difficulté de la manœuvre ce qui peut indiquer comme nous l'avons constaté dans les études précédentes que le DIMSS-PM semble plus sensible au travail mécanique du mouvement qu'à la quantité de ressources cognitives utilisées pour réaliser la tâche. Cependant, le manque de puissance statistique ne permet pas d'affirmer cette absence de sensibilité. Des études à plus grande échelle devraient être effectuées afin d'étudier cette voix.

Ce chapitre 4 a permis de tester la robustesse de nos métriques face à la difficulté de la tâche et des éventuelles relations à la charge cognitive dans un cadre de vol réel. Malgré le faible nombre de pilotes ayant participé à cette expérience, nos résultats sont encourageants pour poursuivre les recherches sur ces métriques du mouvement comme métrique de la charge cognitive en vol réel. En effet, les résultats sont comparables à ceux obtenus lors des expériences de laboratoire. Nos résultats montrent que malgré le caractère écologique et du nombre de facteurs non contrôlés qui peuvent venir impacter l'étude, les résultats des différentes métriques présentent des comportements similaires avec les situations de laboratoire. Il semble intéressant de poursuivre l'analyse de ces métriques, notamment au niveau EMG, qui n'ont pas pu être présentées dans ce manuscrit et de faire d'autres études en condition écologique.

## DISCUSSION GENERALE

Le but de la thèse était de fournir des métriques d'évaluation de la charge cognitive à partir de la modélisation, de la caractérisation des mécanismes de contrôle moteur observés à partir de l'activité du pilote. Cette étude était menée en étudiant la relation entre les aspects du contrôle moteur à différents niveaux d'analyses (cinématique, électromyographique) et des mesures de charge de travail (questionnaire NASA-TLX et DIMSS-PM) au travers de différentes contraintes de l'environnement (mode de contrôle et référentiels). Les objectifs étaient (1) de caractériser la relation entre la difficulté de la tâche, des métriques de la charge de travail et des métriques du mouvement (cinématique, EMG, fonction de coût), (2) de caractériser la relation entre les différents niveaux d'analyses du mouvement et des mesures de la charge de travail classiquement utilisées dans le domaine de l'ergonomie (questionnaire NASA-TLX et DIMSS-PM), (3) d'évaluer nos métriques dans le cadre d'une situation écologique de vol d'hélicoptère.

Comme nous l'avons abordé dans l'avant-propos avec le cas concret d'accident d'hélicoptère, l'évaluation et la quantification de la charge cognitive dans l'aéronautique est un des enjeux majeurs pour diminuer l'accidentologie. Les opérations hélicoptères impliquent une activité de pilotage particulièrement difficile et parfois dangereuse de par l'environnement relativement incertain et le large panel de missions (le vol stationnaire, le décollage vertical et l'atterrissage dans des espaces restreints). L'intérêt de quantifier et d'évaluer la charge cognitive auprès des pilotes est d'améliorer la conception ergonomique des différents dispositifs du cockpit (notamment assistances) ou d'améliorer l'évaluation de ces dispositifs (ou des aéronefs) lors de la phase de certification.

Reprenons la définition de la charge cognitive de [Tricot et Chanquoy \(1996\)](#) qui est définie comme « la quantité de ressources mentales mobilisées par un sujet lors de la réalisation d'une tâche ». Nous avons vu qu'elle était complexe à évaluer car elle est impactée par de nombreux facteurs. Dans nos travaux, nous avons abordé différents facteurs qui influencent le coût cognitif afin de vérifier la fiabilité de nos métriques du mouvement lorsque la charge cognitive de la tâche est modulée par ces facteurs.

Nous avons parlé de l'exigence informationnelle au travers de la variation de la difficulté de la tâche dans une tâche de Fitts. La loi de Fitts est un cadre approprié pour moduler la quantité d'information à traiter au travers de la Task load. Cette première approche nous a permis de déterminer si nos métriques pouvaient être sensible à différents niveaux de Task load.

Nous avons vérifié la robustesse de nos métriques dans différentes conditions :

- Dans différents niveaux de contraintes de la tâche en changeant de référentiel.
- Nous avons étudié l'effet des compétences des participants en analysant l'effet d'expertise en définissant le critère par le nombre d'heures de pilotage.
- Nous avons abordé la modification des moyens d'action en changeant de mode de contrôle au niveau du manche.

Suite à ce rappel de ce qui a été abordé lors de cette thèse, nous allons maintenant discuter chacun des facteurs énoncés ci-dessus, les limites rencontrées et les perspectives possibles.

### 1. Expérience de laboratoire

Pour résumer, nos résultats ont montré :

- (1) La charge cognitive associée à la tâche augmente avec l'augmentation de la difficulté de la tâche,
- (2) Le SNM adapte la stratégie motrice pour répondre à l'augmentation de la difficulté de la tâche,
- (3) Nos métriques du mouvement sont sensibles à la charge cognitive,
- (4) Pas d'observation de l'effet de l'expertise sur nos métriques lors de l'augmentation de l'ID,
- (5) Présence d'une sensibilité de nos métriques à la charge cognitive pour les deux modes de contrôle.

#### 1.1. Facteur influençant la charge cognitive : la quantité informationnelle

Dans ces travaux de thèse nous avons étudié l'effet de la difficulté de la tâche au travers de la loi de Fitts. La littérature a montré que la difficulté de la tâche est un facteur d'influence important de la charge cognitive, qui est majoritairement dépendante des capacités de l'individu à utiliser ses ressources cognitives (i.e. quantité et nature de ses connaissances) de la meilleure façon pour effectuer la tâche.

La loi de Fitts permet de moduler la quantité d'information à traiter par les individus. Nous avons constaté que la modulation de la quantité d'information à traiter (i.e. de la difficulté de la tâche) était représentative de l'augmentation de la charge cognitive de notre tâche grâce aux résultats du score « mental » du NASA-TLX.

Nos résultats de performances de la tâche et de mouvement (nombre de portes validées et le temps de mouvement T<sub>Mt</sub> / T<sub>Me</sub>) expriment la dépendance de ces métriques à la capacité de traitement de l'individu. Nous avons pu constater que plus la difficulté augmente plus la performance diminuait (au niveau de la tâche et du mouvement). Les travaux de [Wickens et Holland \(2000\)](#) ont montré que la performance se dégradait lorsque les ressources de l'opérateur sont inférieures à l'exigence de la tâche. Dans notre cas, les métriques de performance semblent être un marqueur du coût cognitif puisqu'elles sont sensibles à la variation de l'exigence informationnelle qui caractérise la tâche.

Également, lorsque que nous regardons nos résultats cinématiques nous constatons que la position du pic de vitesse arrive plus tôt dans le mouvement. Ce déplacement du

pic de vitesse a montré sur les portraits de phases une dégradation de la cinématique lors que la difficulté de la tâche augmente. Nous avons constaté que le caractère dynamique du mouvement bascule vers une discrétisation du mouvement avec l'augmentation de la difficulté. [Mottet et Boostma \(1999\)](#) avaient montré dans le même cadre (une tâche de pointage réciproque de Fitts) les modifications de l'harmonicité de la trajectoire du mouvement. Ils ont observé pour les IDs faibles un mode de contrôle en cycle limite représentant un mouvement fluide et linéaires alors que pour les IDs difficiles il y a l'apparition d'un mode de contrôle de type point fixe qui représente la non-linéarité du mouvement discrétisé. Le comportement de ce profil a été étudié par [Huys et collègues \(2010\)](#) qui ont montré l'apparition de deux mouvements discrets consécutifs séparés par deux points de rebroussement avec l'augmentation de la difficulté. Ces études ont déterminé que le comportement du mouvement de pointage était défini par un changement bifurcatoire de la dynamique avec l'augmentation de la difficulté de la tâche, représenté par un modèle dynamique non-linéaire ayant des caractéristiques propres. L'évolution de la cinématique du mouvement vers un modèle non-linéaire peut être appuyée également par les travaux de [Jirsa et collègue \(2000\)](#) qui avaient montré la non-linéarité de la loi de Fitts au travers de critères d'optimalité. L'apparition de non-linéarité peut être un marqueur de l'augmentation de la charge cognitive au niveau cinématique. Nous avons au travers de nos résultats montré que ces marqueurs cinématiques étaient sensibles au coût cognitif avec une relation monotone entre ces métriques du mouvement et le score « mental » du NASA-TLX.

Le caractère optimal du mouvement est également une piste intéressante. Les différentes fonctions de coût peuvent à différents niveaux montrer la modulation de la stratégie mise en place par le SNM pour pallier aux contraintes de la tâche. [Berret et collègues \(2011\)](#), avaient déterminé 8 critères d'optimalité de différentes natures (cinématique, dynamique, géodésique, énergétique et musculaire). Nous avons étudié au niveau musculaire la fonction de coût représentant le niveau de co-activation. La co-activation musculaire est décrite comme une stratégie du SNM mise en place pour augmenter la résistance articulaire afin d'augmenter la rigidité articulaire. Ce mécanisme musculaire est un processus d'anticipation (boucle feedforward) qui permet d'anticiper les éventuelles perturbations lors du mouvement ([Lestienne et al 2002, Lastach 2018](#)). La co-activation serait le résultat d'une désinhibition de l'inhibition réciproque. En effet, le SNM a deux stratégies motrices :

- La co-activation (i.e. une activation simultanée des muscles agoniste et antagoniste par l'apparition de co-contractions de muscles antagonistes),
- L'inhibition réciproque (i.e. l'activation du muscle agoniste est accompagnée d'inhibition du muscle antagoniste).

Même si la co-activation est plus coûteuse il semblerait que le gain mécanique apporté soit plus important que la dépense énergétique engendrée.

Nos résultats ont montré une augmentation de la co-activation pour les deux couples musculaires en mode de contrôle en position. L'augmentation de la co-activation semble être une stratégie mise en place pour favoriser la précision du mouvement. [Gribble et collègues \(2003\)](#) avait mis en lumière la relation entre co-contraction pour les mouvements discrets. Nous retrouvons dans nos résultats une plus forte co-activation pour les IDs difficiles qui sont les tâches qui demandent le plus de précision et qui ont par ailleurs un caractère cinématique discret. Nos résultats ont montré une sensibilité au coût

cognitif de nos métriques ce qui indique que cette métrique au niveau musculaire peut être un bon candidat comme marqueur de la charge cognitive.

La question d'optimalité du mouvement amène d'autres questions notamment celle de l'entropie et du bruit biologique. La loi de Fitts est basée sur la théorie de l'information de [Shannon \(1949\)](#). Shannon apporte deux notions clés : celle du théorème 17 de son traité qui indique que le temps de transmission de l'information est proportionnel à la quantité d'information, (2) la notion d'entropie selon laquelle le degré d'incertitude de l'information finale perçue est dépendant de la quantité d'information qu'elle contient. Ces notions abordent l'aspect stochastique de la charge cognitive et du contrôle moteur. Cette notion d'entropie existe au niveau de la charge cognitive notamment avec la présence d'interférence dans l'environnement de la tâche ou de proximités de traitements des informations qui viennent augmenter le niveau de charge cognitive. En effet, il y a un plus grand niveau de ressources cognitive à mettre en jeu pour dissocier et traiter les informations puisqu'elles sont bruitées par d'autres éléments ce qui induit plus d'incertitude.

Nos travaux abordent de façon indirecte la question de l'incertitude et de bruit dans le cadre des résultats obtenus vis-à-vis du mode de contrôle en vitesse. En effet, dans cette expérience nous avons montré que le mouvement en impulsion est induit par le fait que le participant doit anticiper le mouvement de pointage. Cette expérience nous a posé des questions quant à l'aspect stochastique de notre tâche. Les travaux de [Soukoreff et collègues \(2011\)](#) avaient montré que la loi de Fitts et l'entropie donnent différentes quantités d'informations pour une même tâche et la difficulté de la tâche semble sous-évaluer les informations transmises par le mouvement. De plus les travaux de [Todorov \(2004\)](#) apportent une vision par l'incertitude du contrôle du mouvement en abordant l'analyse de l'optimalité du mouvement par le bruit biologique. Contrairement à l'explication de l'optimalité du mouvement par la théorie du contrôle optimal, il suggère que le mouvement n'est pas le résultat de la minimisation de fonction de coût unique mais résulterait d'une minimisation d'un ensemble de fonctions de coût qui correspondent au but que veut atteindre le système sensorimoteur. Il explique la variabilité motrice due à l'incertitude de la tâche/environnement, par le principe d'intervention minimale. Ce principe propose que le système sensorimoteur fait des ajustements dans le but de maximiser la performance motrice. Pour lui, l'incertitude est nécessaire à l'optimalité du mouvement. Dans le cadre de la loi de Fitts, les mouvements rapides semblent impliquer que le bruit du système sensorimoteur est dépendant du contrôle ([Schmidt et al 1979 et Todorov 2002](#)). Ainsi, cette approche de métrique dépendant de l'aspect entropique d'une situation ou tâche peut être pertinente pour évaluer la charge cognitive dans des situations incertaines.

Concernant les métriques de la charge de travail, nous avons vu qu'elles avaient un aspect multi-dimensionnelle et cet aspect ne semble pas approprié pour évaluer spécifiquement la charge cognitive pour différentes raisons. Si on prend le questionnaire NASA-TLX, il a montré des sensibilités différentes à l'exigence informationnelle selon le score observé. Le score « mental » semble être un bon candidat pour objectiver la charge cognitive puisqu'il présente une sensibilité à la manipulation de l'exigence informationnelle. Le score « physique » lui ne semble que peu sensible à la charge cognitive dans nos études. Ces différences posent la question de l'intérêt de la mesure

classique que nous avons appelé score « global » pour expliquer et représenter la charge cognitive des pilotes.

Si nous prenons la mesure du DIMSS-PM, elle semble être plus dépendante des aspects physiques que des aspects cognitifs. Dans nos études, elle semble sensible à la fréquence du mouvement et non à la manipulation de l'exigence informationnelle. Ce constat pose la question ici de la limite de cette mesure, nous pouvons nous demander si cette mesure est fiable uniquement lorsque la nature de la tâche n'impacte pas la fréquence du mouvement. Cette réflexion ainsi que l'exploration des métriques sur le mode de contrôle en vitesse, nous ont amené à repenser nos résultats notamment concernant la possibilité que cette mesure soit dépendante de la fréquence du mouvement. Cette mesure a été construite pour des tâches d'appontage, ce type de tâche comprend de fortes perturbations. Si ce principe est exact, il peut être envisageable que le DIMSS-PM soit plus pertinent dans le cadre d'un mode de contrôle en vitesse dans le cadre de nos études. Dans un environnement fortement perturbé, le pilote effectue beaucoup de correction au manche pour compenser les perturbations. Dans ce cas, les corrections calculées par le DIMSS-PM pourraient être un marqueur de la charge cognitive. Pour vérifier cette hypothèse et explorer cette voie par exemple avec une tâche de Fitts avec des perturbations au manche. La méthode de calcul du nombre de réversion peut jouer un rôle sur la viabilité de cette mesure. Dans notre tâche, l'ID1 implique plus de fréquence et l'ID5 moins de fréquence. La fenêtre d'analyse du DIMSS-PM est de 3 secondes ce qui peut fortement impacter l'interprétation de cette mesure. La prise en compte de la durée du mouvement comme fenêtre de calcul du nombre de réversion peut modifier la valeur du DIMSS-PM.

### 1.2. Autres facteurs : contraintes de la tâche, mode d'action et expertise

#### 1.2.1. Effet du référentiel

Nous avons évoqué dans nos travaux, l'effet des contraintes de la tâche par le changement de référentiel. Les contraintes de la tâche sont définies ici comme l'exigence de la tâche que nous avons modulée par le changement de référentiels puisque les deux référentiels avaient des contraintes différentes. Nous avons montré dans nos études, que les relations de coordinations motrices et celles de charge de travail existaient pour les deux référentiels. Également, nous avons retrouvé la sensibilité à la charge cognitive de nos métriques. Le seul effet du changement de référentiel géocentré à égocentré est le maintien de la performance de la tâche pour les difficultés intermédiaires. Ces résultats semblent similaires à ceux retrouvés dans la littérature ([Wickens et Prevelt, 1995](#) ; [Cho et al, 2017](#) ; [Lin et al, 2017](#)). Cependant, le design de nos expériences ne permet pas de comparer statistiquement les deux référentiels et de valider ou de réfuter l'effet du changement de référentiels. D'autres études sont à mener pour observer les modulations des relations entre les deux référentiels.

Nos métriques semblent sensibles au coût cognitif malgré la variation des contraintes de la tâche.

### 1.2.2. Effet du mode de contrôle

Nous avons abordé le changement de contrôle d'action au travers du changement de mode de contrôle appliqué au manche. Le mode de contrôle en position et en vitesse impliquait un contrôle de l'action différent pour réaliser la tâche de pointage. Nous avons trouvé que la difficulté de la tâche était sensible de façon similaire à la charge cognitive pour les deux modes de contrôle. Néanmoins, les capacités du contrôle de l'action ne semblent pas les mêmes en position et en vitesse. En effet, la dynamique du mouvement n'est plus la même puisque pour le mode de contrôle en position nous avons un mouvement continu alors que pour le mode de contrôle en vitesse nous avons un mouvement en impulsion. L'aspect impulsif du mouvement, implique des stratégies cinématiques et musculaires différentes. Dans le cas du mode de contrôle en vitesse, ce qui se passe dans l'espace de la tâche i.e au niveau du curseur n'est pas représentatif du mouvement effectué au niveau de l'effecteur c'est-dire du bras. Cet aspect est important car il implique de faire des analyses au niveau de ces deux espaces. Ces analyses apportent de nombreuses nuances sur nos résultats sur la modulation des patterns cinématique particulièrement sur la position du pic de vitesse et majoritairement sur la stratégie musculaire mis en jeu dans ce type de configuration. Pour les données EMG, nous constatons que pour un même référentiel à manipulation de l'exigence informationnelle identique, nous avons des réponses motrices différentes. Outre les limites de nos analyses vis-à-vis du délai électromécanique et de la vision réduite des activations musculaires pour les muscles polyarticulaires, cette réflexion mène à penser que le mouvement est différent en fonction de mode de contrôle appliqué au manche. La différence retrouvée entre les deux espaces pourrait s'expliquer par le fait que dans le mode de contrôle en position, il existe un lien direct entre l'atteinte de la position de la cible et l'action d'atteinte ; alors que dans le mode de contrôle en vitesse le lien est indirect entre l'atteinte de la position de la cible et l'action d'atteinte. Ces caractéristiques de positions du pic de vitesse semble aussi observable sur les pilotes de l'étude en situation écologique des essais en vol. Ces constatations posent la question de la formulation de Fitts et elles donnent des perspectives sur la possibilité de travail sur l'intégration du mode de contrôle en vitesse dans l'équation de la loi de Fitts. Nos résultats amènent à penser que le contrôle en vitesse ne semble pas répondre à la même loi que le contrôle en position dans le cadre de cette formulation de Fitts. Il pourrait être intéressant d'essayer d'adapter la loi de Fitts au mode de contrôle en vitesse afin de comprendre les mécanismes qui régissent le mouvement, son contrôle et la charge cognitive associée à la tâche dans ce type de condition.

Nos métriques semblent sensibles à la charge cognitive peu importe le mode de contrôle appliqué. Cependant, l'absence de littérature sur les adaptations sensorimotrices dans ce mode de contrôle en vitesse ouvre un champ d'exploration du traitement de l'information et du contrôle moteur.

Également, nous retrouvons des similitudes entre nos résultats et ceux de [Jagacinski et collègues \(1978\)](#) qui ont montré que le temps de mouvement était linéairement proportionnel à l'ID pour le mode de contrôle en position et en vitesse avec une pente du temps de mouvement deux fois plus importante en mode de contrôle en vitesse que pour un système de contrôle de position. A partir de ces similitudes, aucune conclusion peut être faites à partir de nos données puisque nous n'avons pas pu comparer les deux modes de contrôle, mais cela ouvre le chemin sur d'autres recherches. Il semble intéressant de

comprendre les différences entre ces modes de contrôle pour continuer à explorer l'effet de la modulation du mode de contrôle sur des métriques du mouvement et de la charge cognitive.

### 1.2.3. Effet de l'expertise

Nous avons mis en évidence l'absence d'effet d'expertise de pilotage pour notre tâche peu importe les contraintes de la tâche. Nos résultats ont suggéré que l'expertise ne permettait pas de diminuer la charge cognitive liée à la tâche. L'absence d'effet peut être expliquée car le critère d'expertise choisi (i.e. le pilotage) ne semble pas adapté pour notre tâche.

La littérature a montré que l'expertise d'un individu augmente ses performances de traitement (Ericsson et Kintsh 1995 ; Chi & Glaser 1988, Farrington-Darby & Wilson 2006). D'autres études ont montré que la performance s'accompagne de stratégies plus efficaces au niveau du système musculosquelettique (au niveau cinématique (Mottet et Boostma 1999), au niveau biomécanique (Vereijken et al 1991). Les éléments de la littérature appuient le fait que le critère d'expertise choisi ne semble pas approprié à notre population, ce qui explique que nos métriques ne révèlent pas d'effet de l'expertise du pilotage. Pour confirmer cela, d'autres études spécifiques à l'analyse de ce facteur d'influence doivent être effectuées pour approfondir l'effet d'expertise sur les relations entre les mesures de charges cognitives et celles du mouvement.

### 1.3. Synthèse de la partie sur les expériences de laboratoire

Pour résumer, ces expériences de laboratoire nous apportent des éléments intéressants sur la pertinence de développer des métriques de nature biomécanique pour évaluer la charge cognitive.

Nos différentes métriques sont sensibles au niveau d'exigence informationnelle qui caractérise la tâche de contrôle moteur, ce qui semble en faire des bons marqueurs de la charge cognitive à différents niveaux d'analyse.

Les relations entre les métriques de coordinations motrice (cinématique et EMG) et des métriques de charge de travail (NASA-TLX et DIMSS-PM) ont montré un effet à l'augmentation de la difficulté de la tâche. En particulier, nous avons pu mettre en lumière la sensibilité de certaines de ces métriques avec la charge cognitive (score « mental » du NASA-TLX). Les relations trouvées, nous ont permis de suggérer que certaines de nos métriques sont dépendantes de facteurs cognitifs et d'autres de facteurs dépendant du travail mécanique du mouvement.

Également, les contraintes de la tâche, telles que le cadre de référence dans laquelle elle est exécutée, ne semblent pas impacter la relation entre nos métriques et la charge cognitive. En revanche, le changement de mode de contrôle (position à vitesse) semble apporter des changements de dynamique du mouvement. Le niveau d'expertise ne semble pas montré d'influence sur la sensibilité de nos métriques lors de l'augmentation de la difficulté de la tâche.

## 2. Essais en vol

Dans le cadre de vrais vols, la difficulté de la tâche entre les deux difficultés de vol semble impliquer une augmentation de la charge de travail de façon plus franche pour la dimension mentale. Nous avons suggéré que l'effet de la différence de charge cognitive entre les deux conditions de vols peut impliquer des modifications des patterns cinématiques au niveau de l'effecteur du pilote qui semble similaire au comportement obtenu en condition de laboratoire (chapitre). Même si ces travaux en condition de vol réel ont une visée exploratoire et qu'aucune conclusion statistique a pu être faite, les résultats que nous avons obtenus semble montrer que nos métriques peuvent s'appliquer à des conditions de vol réel. D'un point de vue pratique et de terrain, nos résultats sont très encourageants, d'un point de vue scientifique le fait d'avoir que deux pilotes limites l'interprétation et demanderait à faire une étude à plus grande échelle pour vérifier que le manque de puissance statistique ne masque pas un manque de sensibilité de nos métriques. Également, nos analyses sont limitées en termes de dynamique de vol étudiée.

L'absence de résultat des métriques EMG peuvent s'expliquer par la position du bras qui n'est pas la même entre les expériences de laboratoire et celle des essais en vol ce qui peut impliquer des contraintes musculaires et biomécaniques différentes. Le choix des métriques de co-activation peut avoir un impact mais aussi est-ce que dans le cadre de vol réel certains facteurs peuvent influencer nos métriques (vibration de l'hélico, bruit des systèmes) ? En condition réelle, les capteurs sont soumis à plus de bruit donc on peut se demander : est-ce que nos instruments de mesures sont suffisamment performant. Cette réflexion sur les aspects matériels vient poser la question aussi de la stratégie musculaire. Est-ce que la stratégie musculaire est la même entre des expériences de laboratoire et des situations réels de vols ? Sachant que dans ces dernières les vibrations, les changements de stabilité du corps lors des mouvements de l'hélicoptère peuvent amener d'autres compensation musculaire.

L'ensemble de ces réflexions, nous mènes à penser que le développement de mesures plutôt d'ordre de la mécanique du mouvement notamment avec certaines fonctions de coût pourrait permettre de mieux comprendre et analyser le mouvement en condition réel.

## 3. Les limites de nos travaux

Nos travaux présentent certaines limites dans les expériences de laboratoires.

Nous avons effectué une tâche standardisée dans un cadre de conflit vitesse/précision. Ceci peut représenter une limite car c'est une situation simplifiée qui prend en compte des aspects spécifiques.

Également, nos résultats se basent sur des mouvements latéraux uniquement, ce qui limite nos interprétations à des cas de figures proches de cette configuration.

D'autres limites méthodologiques peuvent être notées notamment sur le choix des filtres au niveau EMG et des méthodes de calculs de co-activations, l'absence de prise en

compte du délai électromécanique. En ce qui concerne l'utilisation de filtres EMG, il n'existe pas de méthodologies permettant de rationaliser le traitement du signal EMG. De la même façon, il n'existe pas de règles permettant de choisir de façon consensuelle le choix du seuil d'activation d'un muscle.

### 4. Perspectives

Nos travaux apportent plusieurs ouvertures et perspectives possibles.

#### 4.1. Caractère anisotropique de nos métriques

Nos études ont été faites dans un cadre standardisé et spécifique à une tâche en conflit vitesse/précision pour des mouvements latéraux et les métriques ont été analysées dans un plan frontal (i.e. mouvements latéraux) pour des modulations de déplacements latéraux au niveau du vol de l'hélicoptère.

Nous pouvons envisager de répliquer ces mesures sur d'autres commandes de vol. Par exemple :

- Sur l'axe transversal (i.e. haut/bas) avec la commande du collectif
- Sur l'axe longitudinal (i.e. avant/arrière) avec les modulations en avancement de la commande du cyclique.
- Sur la rotation en lacet avec la commande du palonnier.

En effet, le pilotage d'hélicoptère implique de nombreux couplages entre le traitement des informations des différentes commandes et les actions réalisées au niveau de celles-ci.

#### 4.2. Dépendance de l'effecteur

La notion de couplage perception/action, apporte la question de la dépendance de l'effecteur à la charge cognitive. Est-ce que le couplage est identique entre les mouvements des bras (i.e. actions sur les commandes du cyclique et collectif) et les mouvements des jambes (i.e. actions sur les commandes de palonnier) ? Ce qui amène une seconde question : est-ce que la charge cognitive affecte de la même façon les actions du pilote sur les différents types de commandes ? Pouvons-nous être certains que les stratégies cognitives et motrices mise en place avec l'augmentation de la charge cognitive sont les mêmes entre la coordination motrice des bras et celle des jambes ?

#### 4.3. Lien avec l'automatisation des commandes de vols

La charge cognitive et l'automatisation est un sujet de recherche important en aéronautique. Aujourd'hui, il existe de nombreuses fonctions d'aide au pilotage au niveau

des commandes de vol tel que le pilote automatique (noté PA). Il est largement utilisé en vol selon les situations. Il peut être engagé indépendamment sur chaque axe de contrôle de l'aéronef (i.e. roulis, tangage, lacet).

Pour concevoir des commandes de vols qui sont les plus ergonomiques possibles il faut comprendre dans quelle mesure les informations restituées par les commandes sont compréhensibles par le pilote et n'augmentent pas la charge cognitive. Dans ce cadre, l'étude de la compréhension de nos métriques face aux modulations du pilote automatique pourrait être une piste de recherche intéressante. Elle permettrait d'avoir des indications sur le coût cognitif de la tâche de pilotage au travers du mouvement en fonction de la quantité d'automatisation du vol via le PA.

#### 4.4. L'évaluation de la charge cognitive pour la conception et la certification

La question de l'évaluation de la charge cognitive dans le cadre de la conception des dispositifs de cockpit (assistance ou système) est également une perceptive qui peut être innovante. En effet, compte tenu de la complexité de pilotage, des dispositifs d'assistance au pilotage ont vu le jour pour réduire la complexité de la tâche à réaliser et, par voie de conséquence, améliorer les performances et la sécurité des opérations (Petermeijer et al., 2015). Les dispositifs les plus concernés sont les mini manches actifs. Le design des retours appliqués au manche est une source de recherches pour de nombreux industriels de l'aéronautique. L'aspect haptique pour la conception des assistances au niveau du manche, commence à être de plus en plus investigué. En effet, le fait d'utiliser le canal kinesthésique comme moyen privilégié pour transmettre le dialogue entre le pilote et la machine peut faciliter le contrôle de l'aéronef. Le principe d'utiliser la modalité haptique a été envisagé dans le cadre de la conception des commandes de vol électriques (SSU « side-stick unit »), une technologie qui va progressivement équiper les futurs hélicoptères. Cependant, il n'existe aujourd'hui aucune méthode permettant de concevoir des fonctions haptiques capables de satisfaire des critères ergonomiques (i.e., biomécaniques, de contrôle moteur...) dédiés à la minimisation du coût cognitif, de sorte qu'un grand nombre de ces fonctions d'assistance est basé sur des approches empiriques, peu généralisables (Olivari et al., 2014).

Dans le but de designer des retours haptiques adaptées au système sensorimoteur et à la gestion de la charge cognitive du pilote, il semble intéressant de pouvoir tester nos métriques du mouvement pour évaluer le coût cognitif inhérent à l'utilisation de fonctions d'assistance haptique implémentées dans le manche.

Également, l'évaluation et la quantification de la charge cognitive au niveau de la certification de ces nouveaux dispositifs dans le cockpit est une voie intéressante. Le fait de pouvoir quantifier au travers du mouvements des pilotes en vol la charge cognitive pour certifier un appareil ou un nouvel élément du cockpit pourrait être complémentaire des tests déjà effectués par les pilotes d'essais.

#### 4.5. Méthode d'évaluation pour l'amélioration de l'apprentissage des pilotes

Les résultats de nos travaux amènent une ouverture pertinente quant à l'usage de métriques de charge cognitive liées au mouvement pour caractériser les processus d'apprentissage des pilotes. L'apprentissage est une dynamique qui va permettre à l'apprenant d'atteindre un invariant qui est représentatif d'un comportement constant et stable. Comment l'apprenant se rapproche des performances de l'expert ? Autrement dit, comment un élève pilote va -il- acquérir les compétences nécessaires pour arriver au niveau du pilote expert ? L'évaluation de la charge cognitive durant les différentes phases de l'apprentissage du pilotage permettrait de comprendre quelles dynamiques cognitives et motrices ont été mises en jeu pour atteindre un comportement expert.

## CONCLUSION

Cette thèse avait pour but de fournir des métriques d'évaluation de la charge cognitive à partir de la modélisation, de la caractérisation des mécanismes de contrôle moteur observés à partir de l'activité du pilote.

Nos expériences ont permis de (1) caractériser la relation entre nos métriques et celle de la charge de travail lors de l'augmentation de la difficulté de la tâche, (2) de caractériser la relation entre nos métriques du mouvement et les mesures de charge de travail, (3) de définir les relations entre nos métriques du mouvement et le coût cognitif, (4) d'évaluer la robustesse de nos métriques dans le cadre d'une situation écologique de vol d'hélicoptère.

L'ensemble de ces travaux semble montrer que ces métriques associées au mouvement sont pertinentes et robustes pour évaluer la charge cognitive. Elles demandent à être investiguées de façon plus approfondie dans d'autres situations (pointage en 2D, 3D, steering law), à d'autres niveaux d'analyses (fonction de coût) et de mieux comprendre leur évolution dans le mode de contrôle en vitesse pour améliorer leur intégration en condition réelle.

## **MENTION SPECIALE**

Je tiens à rajouter une mention spéciale à mon manuscrit de thèse.

L'ensemble de mes travaux de thèse est le fruit d'un travail d'équipe conséquent avec : ma direction de thèse (directeur/encadrant), deux membres de l'équipe ICNA Christian Schulte et Nicolas Lantos.

Leur apport et leur investissement dans les différentes phases des expériences laboratoires (création de la simulation et traitement de données par le script python) puis des essais en vol (élaboration et traitements) ont permis de faire de cette thèse ce qu'elle est.

Merci à l'équipe de la DGA-EV (Guillaume, Gaëlle, Jöel, Tony, Gwen) pour leur investissement pour la réalisation des essais en vol.

Merci à eux.

## DECLARATIONS

### Contributions auteurs

KS a rédigé la première version du manuscrit. JCS, BB, NL et SH ont revu le manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé la version soumise.

### Conflits d'intérêts

Les auteurs n'ont aucun intérêt financier ou non financier à divulguer.

### Financement

Ce travail a été soutenu par l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) et l'Agence nationale de la recherche française par l'ANR Blade (ANR-18-CE10-0001). Également, ce travail a été soutenu durant la dernière année par la coopération ONERA/DGA/USA Army via le projet AHFIR « Rotary Wing Aeromechanics and Human Factors Integration Research ».

## Articles publiés

Steiner, K., Berberian, B., Lantos, N., Schulte, C., Rakotomamonjy, T., Pelegrin, N., ... & Sarrazin, J. C. (2022, June). Characterization of action optimality criteria as a complementary assessment of pilot workload. In *9<sup>TH</sup> EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS)*. Proceedings of the 9th European Conference for Aerospace Sciences. Lille, France, 27 June-1 July, 2022.

### Conférences effectuées : Présentations posters

Juillet 2022 – Dublin (Irlande)

**31<sup>ème</sup> Congrès du Contrôle Neural du Mouvement (NCM).**

Avril 2022 – Turin (Italie)

**Réunion Annuelle de la Société des Facteurs Humains et de l'Ergonomie (HFES).**

Octobre 2021 – Conférence Virtuelle

**46<sup>ème</sup> Congrès de la Société de Biomécanique.**

### Conférences effectuées : Présentations orales (talk)

Septembre 2022 – Dublin (Irlande)

**Conférence Européenne sur la sécurité et la Fiabilité (ESREL).**

Juin 2022 – Lilles (France)

**9<sup>ème</sup> Conférence Européenne sur l'Aéronautique et les Sciences Spatiales (EUCASS) et publication dans proceedings.**

Steiner, K., Berberian, B., Lantos, N., Schulte, C., Rakotomamonjy, T., Pelegrin, N., ... & Sarrazin, J. C. (2022, June). Characterization of action optimality criteria as a complementary assessment of pilot workload. In *9<sup>TH</sup> EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS)*. Proceedings of the 9th European Conference for Aerospace Sciences. Lille, France, 27 June-1 July, 2022.

Avril 2021- Conférence Virtuelle

**Présentation à l'atelier sur l'exosquelette de l'Agence Européenne de Défense (AED).**

## BIBLIOGRAPHIE

LIEN DU RAPPORT DU BEA : [HTTPS://S.RFI.FR/MEDIA/DISPLAY/73FF081A-633D-11EB-91A9-005056BFF430/T-2019-15-A.PDF](https://s.rfi.fr/media/display/73ff081a-633d-11eb-91a9-005056bff430/t-2019-15-a.pdf)

ROSCOE, M. F. AND WILKINSON, C. H., DIMSS – JSHIP'S MODELING AND SIMULATION PROCESS FOR SHIP/HELICOPTER TESTING AND TRAINING, AIAA MODELING AND SIMULATION TECHNOLOGIES CONFERENCE AND EXHIBIT, MONTEREY, 2002

JENNINGS, S., CRAIG, G., CARIGNAN, S., ELLIS, K., & QINETIQ, D. T. (2005, SEPTEMBER). EVALUATING CONTROL ACTIVITY AS A MEASURE OF WORKLOAD IN FLIGHT TEST. IN PROCEEDINGS OF THE HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING (VOL. 49, NO. 1, PP. 64-67). SAGE CA: LOS ANGELES, CA: SAGE PUBLICATIONS.

SHANNON C.E., WEAVER W., (1949), THE MATHEMATICAL THEORY OF COMMUNICATION. UNIVERSITY OF ILLINOIS PRESS, URBANA, IL.

FITTS, P. M., & PETERSON, J. R. (1964). INFORMATION CAPACITY OF DISCRETE MOTOR RESPONSES. JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY, 67(2), 103.

WELFORD, A. T. (1959). PSYCHOMOTOR PERFORMANCE.

WELFORD, A. T. (1959). EVIDENCE OF A SINGLE-CHANNEL DECISION MECHANISM LIMITING PERFORMANCE IN A SERIAL REACTION TASK. QUARTERLY JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY, 11(4), 193-210.

TRICOT, A., & CHANQUOY, L. (1996). INTRODUCTION: LA CHARGE MENTALE, "VERTU DORMITIVE" OU CONCEPT OPERATIONNEL?. PSYCHOLOGIE FRANÇAISE, 41(4), 313-318.

CEGARRA, J., & CHEVALIER, A. (2008). THE USE OF THOLOS SOFTWARE FOR COMBINING MEASURES OF MENTAL WORKLOAD: TOWARD THEORETICAL AND METHODOLOGICAL IMPROVEMENTS. BEHAVIOR RESEARCH METHODS, 40(4), 988-1000. JOURNAL ARTICLE.

ZHANG, X., QU, X., XUE, H., ZHAO, H., LI, T., & TAO, D. (2019). MODELING PILOT MENTAL WORKLOAD USING INFORMATION THEORY. THE AERONAUTICAL JOURNAL, 123(1264), 828-839.

MILLER, S. (2001). WORKLOAD MEASURES. NATIONAL ADVANCED DRIVING SIMULATOR. IOWA CITY, UNITED STATES.

CEGARRA J., & MORGADO N. (2009), ÉTUDE DES PROPRIETES DE LA VERSION FRANCOPHONE DU NASATLX. IN COMMUNICATION PRESENTEE A LA CINQUIEME EDITION DU COLLOQUE DE PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE (EPIQUE) (PP. 28-30).

WICKENS, C.D., & HOLLANDS, J.G. (2000). ENGINEERING PSYCHOLOGY AND HUMAN PERFORMANCE. NEW JERSEY: PRENTICE HALL. WILSON, J. R., & RAJAN, J. A. (1995). HUMAN-MACHINE INTERFACES FOR SYSTEMS CONTROL. EVALUATION OF HUMAN WORK, 357-405.

SPERANDIO, J.C. (1977). LA REGULATION DES MODES OPERATOIRES EN FONCTION DE LA CHARGE DE TRAVAIL CHEZ LES CONTROLEURS DE TRAFIC AERIEN. LE TRAVAIL HUMAIN, 40, 249-256

## BIBLIOGRAPHIE

---

BARROUILLET, P. (1996). RESSOURCES, CAPACITES COGNITIVES ET MEMOIRE DE TRAVAIL: POSTULATS, METAPHORES ET MODELES: LA CHARGE MENTALE. *PSYCHOLOGIE FRANÇAISE*, 41(4), 319-338.

MATTHEWS, G., WARM, J. S., REINERMAN-JONES, L. E., LANGHEIM, L. K., WASHBURN, D. A., & TRIPP, L. (2010). TASK ENGAGEMENT, CEREBRAL BLOOD FLOW VELOCITY, AND DIAGNOSTIC MONITORING FOR SUSTAINED ATTENTION. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY: APPLIED*, 16(2), 187.

MULDER, G. (1986). THE CONCEPT AND MEASUREMENT OF MENTAL EFFORT. IN *ENERGETICS AND HUMAN INFORMATION PROCESSING* (PP. 175-198). SPRINGER, DORDRECHT.

ROSCOE, A. H., & ELLIS, G. A. (1990). A SUBJECTIVE RATING SCALE FOR ASSESSING PILOT WORKLOAD IN FLIGHT: A DECADE OF PRACTICAL USE (NO. RAE-TR-90019). ROYAL AEROSPACE ESTABLISHMENT FARNBOROUGH (UNITED KINGDOM).

AUDLEY, R. J., ROUSE, W., SENDERS, J., & SHERIDAN, T. (1979). FINAL REPORT OF MATHEMATICAL MODELLING GROUP. IN *MENTAL WORKLOAD: ITS THEORY AND MEASUREMENT* (PP. 269-285). BOSTON, MA: SPRINGER US.

RASMUSSEN, J. (1986). *INFORMATION PROCESSING AND HUMAN-MACHINE INTERACTION: AN APPROACH TO COGNITIVE ENGINEERING*. NEW YORK: ELSEVIER SCIENCE.

RASMUSSEN, J. (1976). OUTLINES OF A HYBRID MODEL OF THE PROCESS PLANT OPERATOR. IN T. B. SHERIDAN & G. JOHANNSEN (EDS.), *MONITORING BEHAVIOUR AND SUPERVISORY CONTROL*, 371-383. NEW YORK: PLENUM.

HANCOCK, P.A. & SZALMA, J.L. (2006). STRESS AND NEUROERGONOMICS. IN: R. PARASURAMAN AND M. RIZZO (EDS.), *NEUROERGONOMICS: THE BRAIN AT WORK* (PP 195-206). OXFORD: OXFORD UNIVERSITY PRESS.

DE WAARD, D. (1996). *THE MEASUREMENT OF DRIVERS' MENTAL WORKLOAD*. NETHERLANDS: GRONINGEN UNIVERSITY, TRAFFIC RESEARCH CENTER.

FUNKE, J. (2001). DYNAMIC SYSTEMS AS TOOLS FOR ANALYSING HUMAN JUDGEMENT. *THINKING AND REASONING*, 7, 69-89.

LIU, P., & LI, Z. (2012). TASK COMPLEXITY: A REVIEW AND CONCEPTUALIZATION FRAMEWORK. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INDUSTRIAL ERGONOMICS*, 42(6), 553-568.  
ZIMMERMAN, M.E. (2011). TASK LOAD. IN: KREUTZER, J.S., DELUCA, J., CAPLAN, B. (EDS) *ENCYCLOPEDIA OF CLINICAL NEUROPSYCHOLOGY*. SPRINGER, NEW YORK, NY.

LOWNDES BR, FORSYTH KL, BLOCKER RC, DEAN PG, TRUTY MJ, HELLER SF, BLACKMON S, HALLBECK MS, NELSON H. NASA-TLX ASSESSMENT OF SURGEON WORKLOAD VARIATION ACROSS SPECIALTIES. *ANN SURG*. 2020 APR;271(4):686-692.

RAHMAN, S. A., BORST, C., MULDER, M., & VAN PAASSEN, M. M. (2012). MEASURING SECTOR COMPLEXITY: SOLUTION SPACE-BASED METHOD. IN *ADVANCES IN AIR NAVIGATION SERVICES*. INTECHOPEN.

ERICSSON, K. A., & KINTSCH, W. (1995). LONG-TERM WORKING MEMORY. *PSYCHOLOGICAL REVIEW*, 102(2), 211.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- CHI, M. T., GLASER, R., & FARR, M. J. (EDS.). (2014). THE NATURE OF EXPERTISE. PSYCHOLOGY PRESS.
- FARRINGTON-DARBY, T., & WILSON, J. R. (2006). THE NATURE OF EXPERTISE: A REVIEW. APPLIED ERGONOMICS, 37(1), 17-32.
- SCHNEIDER, W., & SHIFFRIN, R. M. (1977). CONTROLLED AND AUTOMATIC HUMAN INFORMATION PROCESSING : I. DETECTION, SEARCH, AND ATTENTION. PSYCHOLOGICAL REVIEW, 84(1), 1-66.
- CHANQUOY, L., TRICOT, A., & SWELLER, J. (2007). LA CHARGE COGNITIVE : THEORIE ET APPLICATIONS. A. COLIN.
- MORAY, N. (1967). WHERE IS CAPACITY LIMITED? A SURVEY AND A MODEL. ACTA PSYCHOLOGICA, 27, 84-92.
- MORAY, N., JOHANSEN, J., PEW, R. D., RASMUSSEN, J., SANDERS, A. F. & WICKENS, C. D. (1979). REPORT OF THE EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY GROUP. IN N. MORAY (ED.), MENTAL WORKLOAD: ITS THEORY AND MEASUREMENT (PP. 101-114). NEW YORK: PLENUM PRESS.
- BROADBENT, D. E. (1958). PERCEPTION AND COMMUNICATION. PERGAMON PRESS.
- WICKENS, C. D. (1984). PROCESSING RESOURCES IN ATTENTION/R. PARASURAMAN, DR DAVIS (EDS.). VARIETIES OF ATTENTION. ACADEMIC PRESS, ORLANDO, FL.
- WICKENS, C. D. (2002). MULTIPLE RESOURCES AND PERFORMANCE PREDICTION. THEORETICAL ISSUES IN ERGONOMICS SCIENCE, 3(2), 159-17.
- BADDELEY, A. D. (2013). THE CONCEPT OF WORKING MEMORY. IN MODELS OF SHORT-TERM MEMORY (PP. 1-27). PSYCHOLOGY PRESS.
- BADDELEY, A. D. (1986). WORKING MEMORY. OXFORD: OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- BADDELEY, A. D., & HITCH, G. (1974). WORKING MEMORY. IN G.H. BOWER (ED.), THE PSYCHOLOGY OF LEARNING AND MOTIVATION: ADVANCES IN RESEARCH AND THEORY (VOL. 8, PP. 47-89). NEW YORK: ACADEMIC PRESS.
- WICKENS, C. D. (2017). MENTAL WORKLOAD: ASSESSMENT, PREDICTION AND CONSEQUENCES. IN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HUMAN MENTAL WORKLOAD: MODELS AND APPLICATIONS (PP. 18-29). SPRINGER, CHAM.
- YOUNG, M. S., BROOKHUIS, K. A., WICKENS, C. D., & HANCOCK, P. A. (2015). STATE OF SCIENCE: MENTAL WORKLOAD IN ERGONOMICS. ERGONOMICS, 58(1), 1-17.
- WILSON, J. R., & RAJAN, J. A. (1995). HUMAN-MACHINE INTERFACES FOR SYSTEMS CONTROL. EVALUATION OF HUMAN WORK: A PRACTICAL ERGONOMICS METHODOLOGY, 357-405.
- SPERANDIO J.-C, (1972), "CHARGE DE TRAVAIL ET RÉGULATION DES PROCESSUS OPÉRATOIRES », LE TRAVAIL HUMAIN, 35,85-93.

## BIBLIOGRAPHIE

---

SPERANDIO, J. C. (1978). THE REGULATION OF WORKING METHODS AS A FUNCTION OF WORKLOAD AMONG AIR TRAFFIC CONTROLLERS. *ERGONOMICS*, 21, 367–390.

MARTIN, P., CALHOUN, L. C. P., SCHNELL, T., & THOMPSON, C. (2019). OBJECTIVE MEASURES OF PILOT WORKLOAD.

MARTIN, C., HOURLIER, S., & CEGARRA, J. (2013). LA CHARGE MENTALE DE TRAVAIL : UN CONCEPT QUI RESTE INDISPENSABLE, L'EXEMPLE DE L'AERONAUTIQUE. *LE TRAVAIL HUMAIN*, 76(4), 285-308.

WILKINSON, C. AND ROSCOE M. F. (2002), DIMSS "JSHIP'S MODELING AND SIMULATION PROCESS FOR SHIP-HELICOPTER TESTING AND TRAINING," AIAA PAPER 2002-4597 MODELING AND SIMULATION TECHNOLOGIES CONFERENCE AND EXHIBITION MONTERAY CA

LEPLAT, J. (1977). LES FACTEURS DETERMINANT LA CHARGE DE TRAVAIL. *LE TRAVAIL HUMAIN*, 40, 195-202.

PAAS, F. G., & VAN MERRIËNBOER, J. J. (1993). THE EFFICIENCY OF INSTRUCTIONAL CONDITIONS: AN APPROACH TO COMBINE MENTAL EFFORT AND PERFORMANCE MEASURES. *HUMAN FACTORS*, 35(4), 737-743.

COOPER, G. E. & HARPER, R. P. (1969). THE USE OF PILOT RATING IN THE EVALUATION OF AIRCRAFT HANDLING QUALITIES. MOFFETT FIELD, CALIFORNIA: NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, AMES RESEARCH CENTER.

HART, S. G., & STAVELAND, L. E. (1988). DEVELOPMENT OF NASA-TLX (TASK LOAD INDEX): RESULTS OF EMPIRICAL AND THEORETICAL RESEARCH. IN *ADVANCES IN PSYCHOLOGY* (VOL. 52, PP. 139-183). NORTH-HOLLAND.

REID, G. B., & NYGREN, T. E. (1988). THE SUBJECTIVE WORKLOAD ASSESSMENT TECHNIQUE: A SCALING PROCEDURE FOR MEASURING MENTAL WORKLOAD. IN *ADVANCES IN PSYCHOLOGY* (VOL. 52, PP. 185-218). NORTH-HOLLAND.

VOGT, J., HAGEMANN, T., & KASTNER, M. (2006). THE IMPACT OF WORKLOAD ON HEART RATE AND BLOOD PRESSURE IN EN-ROUTE AND TOWER AIR TRAFFIC CONTROL. *JOURNAL OF PSYCHOPHYSIOLOGY*, 20(4), 297-314.

KAHNEMAN, D. (1973). *ATTENTION AND EFFORT*. PRENTICE-HALL.

KAHNEMAN, D., & BEATTY, J. (1966). PUPIL DIAMETER AND LOAD ON MEMORY. *SCIENCE*, 154(3756), 1583- 1585.

BRISSETT, N. AND MÉZAN (2005) "ADS 33 HANDLING QUALITIES EVALUATION OF ADVANCED RESPONSE TYPES CONTROL LAWS ON THE ACT/FHS DEMONSTRATOR" AMERICAN HELICOPTER SOCIETY FORUM 61, TEXAS

THORNDYCRAFT, D.C. AND CRAIG G., "TRIAL IGUANA: AN EVALUATION OF CONFORMAL SYMBOLOGY USING DISPLAY NIGHT VISION GOGGLES." PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN ROTORCRAFT FORUM 2004.

## BIBLIOGRAPHIE

---

MORTAZAVI, M. R., RAISSI, K., & HASHEMI MEHNE, S. H. (2019). PILOT WORKLOAD ASSESSMENT UNDER DIFFERENT LEVELS OF AUTOPILOT FAILURE. *SCIENTIAIRANICA*, 26, 114-126.

MILLER, E. K., & COHEN, J. D. (2001). AN INTEGRATIVE THEORY OF PREFRONTAL CORTEX FUNCTION. *ANNUAL REVIEW OF NEUROSCIENCE*, 24(1), 167-202.

JOHANNSEN, G. , MORAY, N. , PEW, R., RASMUSSEN, J., SANDERS, A. AND WICKENS, C. (1979). FINAL REPORT OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY GROUP. IN N. MORAY (ED.) *MENTAL WORKLOAD; ITS THEORY AND MEASUREMENT*. NEW YORK, NEW YORK: PLENUM PRESS.

HILBURN, B. (2004). COGNITIVE COMPLEXITY IN AIR TRAFFIC CONTROL: A LITERATURE REVIEW. *EEC NOTE*, 4(04).

LAUTREY, J. (2003). LA PSYCHOLOGIE DIFFERENTIELLE A L'ÉPREUVE DE LA VARIABILITE INTRAINDIVIDUELLE. IN A. VOM HOFE, H. CHARVIN, J.-L. BERNAUD & D. GUEDON (EDS.), *PSYCHOLOGIE DIFFERENTIELLE – RECHERCHES ET REFLEXIONS* (PP. 9-28). RENNES : PUR.

SHACKMAN, A. J., SARINOPOULOS, I., MAXWELL, J. S., PIZZAGALLI, D. A., LAVRIC, A., & DAVIDSON, R. J. (2006). ANXIETY SELECTIVELY DISRUPTS VISUOSPATIAL WORKING MEMORY. *EMOTION*, 6(1), 40.

RAUFASTE, E., DAURAT, A., MÉLAN, C., & RIBERT-VAN DE WEERDT, C. (2004). ASPECTS INTENSIFS DE LA COGNITION EN SITUATION DE TRAVAIL. *PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE: TENDANCES ACTUELLES*, 175-199.

VARELA, F. J., THOMPSON, E., & ROSCH, E. (2017). *THE EMBODIED MIND, REVISED EDITION: COGNITIVE SCIENCE AND HUMAN EXPERIENCE*. MIT PRESS.

VARELA, F., LACHAUX, J. P., RODRIGUEZ, E., & MARTINERIE, J. (2001). THE BRAINWEB: PHASE SYNCHRONIZATION AND LARGE-SCALE INTEGRATION. *NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE*, 2, 229-239.

GIBSON, J. J. (2014). *THE ECOLOGICAL APPROACH TO VISUAL PERCEPTION: CLASSIC EDITION*. PSYCHOLOGY PRESS

FRANKLIN, D. W., & WOLPERT, D. M. (2011). COMPUTATIONAL MECHANISMS OF SENSORIMOTOR CONTROL. *NEURON*, 72(3), 425-442.

HOGAN, N. (1987, MARCH). STABLE EXECUTION OF CONTACT TASKS USING IMPEDANCE CONTROL. IN *PROCEEDINGS. 1987 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (VOL. 4, PP. 1047-1054)*. IEEE.

SHERRINGTON, C. (1952). *THE INTEGRATIVE ACTION OF THE NERVOUS SYSTEM*. CUP ARCHIVE.

TURVEY, M. T. (1990). COORDINATION. *AMERICAN PSYCHOLOGIST*, 45(8), 938.

TURVEY, M. T. (1992). AFFORDANCES AND PROSPECTIVE CONTROL: AN OUTLINE OF THE ONTOLOGY. *ECOLOGICAL PSYCHOLOGY*, 4(3), 173-187.

KUGLER, P. N., & TURVEY, M. T. (2015). *INFORMATION, NATURAL LAW, AND THE SELF-ASSEMBLY OF RHYTHMIC MOVEMENT*. ROUTLEDGE.

## BIBLIOGRAPHIE

---

SCOTT H., (2004), OPTIMAL FEEDBACK CONTROL AND THE NEURAL BASIS OF VOLITIONAL MOTOR CONTROL. NAT REV NEUROSCI, 5(7):532–546.

GUIGON E., BARADUC P., DESMURGET M., (2008), COMPUTATIONAL MOTOR CONTROL : REDUNDANCY AND INVARIANCE. J NEUROPHYSIOL, 97(1):331–347.

GUIARD, Y. (1993). ON FITTS'S AND HOOKE'S LAWS: SIMPLE HARMONIC MOVEMENT IN UPPER-LIMB CYCLICAL AIMING. ACTA PSYCHOLOGICA, 82(1-3), 139-159.

ALBRECHT S., (2013), MODELING AND NUMERICAL SOLUTION OF INVERSE OPTIMAL CONTROL PROBLEMS FOR THE ANALYSIS OF HUMAN MOTIONS. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN .

CHEFFI S., ROKOTOMAMONJY T., BINET L., SARRAZIN J.C., (2015), A BI-LEVEL OPTIMIZATION APPROACH TO GET AN OPTIMAL COMBINATION OF COST FUNCTIONS FOR PILOT'S ARM MOVEMENT: THE CASE OF HELICOPTER'S FLYING AID FUNCTIONS WITH HAPTIC FEEDBACK, DIGITAL HUMAN MODELING. APPLICATIONS IN HEALTH, SAFETY, ERGONOMICS AND RISK MANAGEMENT: ERGONOMICS AND HEALTH , 248-25

BERRET B., CHIOVETTO E., NORI F., POZZO T., (2011) ,EVIDENCE FOR COMPOSITE COST FUNCTIONS IN ARM MOVEMENT PLANNING: AN INVERSE OPTIMAL CONTROL APPROACH, PLOSCOMPUTATIONALBIOLOGY,7(10)e10002183.

BERRET B.,( 2008B), INTEGRATION DE LA FORCE GRAVITAIRE DANS LA PLANIFICATION MOTRICE ET LE CONTROLE DES MOUVEMENTS DU BRAS ET DU CORPS (THESE)

BERRET B., DARLOT C., JEANF., POZZO T., PAPAXANTHIS C., GAUTHIER JP., (2008A), THE INACTIVATION PRINCIPLE: MATHEMATICAL SOLUTIONS MINIMIZING THE ABSOLUTE WORK AND BIOLOGICAL IMPLICATIONS FOR THE PLANNING OF ARM MOVEMENTS, PLoS COMPUT BIOL., 4(10):E1000194.

LOECHES DE LA FUENTE H., FERNANDEZ L., SARRAZIN J.C., BERTON E., RAO G., (2014A), INFLUENCE OF TASK CONSTRAINTS AND DEVICE PROPERTIES ON MOTOR PATTERNS IN A REALISTIC CONTROL SITUATION, JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR, 46 (1): 1–15

LOECHES DE LA FUENTE H., FERNANDEZ L., SARRAZIN J.C., BERTON E., RAO G., (2014B), INFLUENCE OF TASK CONSTRAINTS AND DEVICE PROPERTIES ON MOTOR PATTERNS IN A REALISTIC CONTROL SITUATION, JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR, 46 (1): 1–15.

GRIFFLE P.L., MULLIN L.I., COTHROS N., MATTAR A., (2003),ROLE OF COCONTRACTION IN ARM MOVEMENT ACCURACY, J NEUROPHYSIOL 89: 2396–2405.

TODOROV E., (2004), OPTIMALITY PRINCIPLES IN SENSORIMOTOR CONTROL. NAT NEUROSCI, 7(9):907–915.

TODOROV, E., & JORDAN, M. I. (2002). OPTIMAL FEEDBACK CONTROL AS A THEORY OF MOTOR COORDINATION. NATURE NEUROSCIENCE, 5(11), 1226-1235.

ROSE C., (2012), MODELISATION STOCHASTIQUES POUR RAISONNEMENT MEDICALE ET SES APPLICATIONS A LA TELEMEDECINE (THESE)

## BIBLIOGRAPHIE

---

BERNSTEIN, N.A. (1967). THE COORDINATION AND REGULATION OF MOVEMENTS. OXFORD: PERGAMON PRESS.

CAMPOS, F. M. M. O., & CALADO, J. M. F. (2009). APPROACHES TO HUMAN ARM MOVEMENT CONTROL—A REVIEW. ANNUAL REVIEWS IN CONTROL, 33(1), 69-77.

FLASH T., HOGAN N., (1985), THE COORDINATION OF ARM MOVEMENTS : AN EXPERIMENTALLY CONFIRMED MATHEMATICAL MODEL. J NEUROSCI, 5(7):1688–1703.

UNO M., KAWATO M., SUZUKI R., (1989), FORMATION AND CONTROL OF OPTIMAL TRAJECTORY IN HUMAN MULTIJOINT ARM MOVEMENT. MINIMUM TORQUE-CHANGE MODEL. BIOL CYBERN, 61(2):89–101.

TODOROV, E., & JORDAN, M. I. (1998). SMOOTHNESS MAXIMIZATION ALONG A PREDEFINED PATH ACCURATELY PREDICTS THE SPEED PROFILES OF COMPLEX ARM MOVEMENTS. JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY, 80(2), 696-714.

SCHMIDT R.A., LEE T.D., (1999), MOTOR CONTROL AND LEARNING. HUMAN KINETICS.

MEYER, D. E., ABRAMS, R. A., KORNBLUM, S., WRIGHT, C. E., & KEITH SMITH, J. E. (1988). OPTIMALITY IN HUMAN MOTOR PERFORMANCE: IDEAL CONTROL OF RAPID AIMED MOVEMENTS. PSYCHOLOGICAL REVIEW, 95(3), 340.

MEYER D.E., SMITH J.E.K., KORNBLUM S., ABRAMS R.A., WRIGHT C.E., (1990), SPEED-ACCURACY TRADE-OFFS IN AIMED MOVEMENTS: TOWARD A THEORY OF RAPID VOLUNTARY ACTION. IN: JEANNEROD M (ED) ATTENTION AND PERFORMANCE XIII (PP 173- 226). HILLSDALE: ERLBAUM.

HOFF B., ARBIB M.A., (1992), A MODEL OF THE EFFECTS OF SPEED, ACCURACY, AND PERTURBATION ON VISUALLY GUIDED REACHING. EXPERIMENTAL BRAIN RESEARCH, 22, 285-306.

HOFF B., ARBIB M.A., (1993), MODELS OF TRAJECTORY FORMATION AND TEMPORAL INTERACTION OF REACH AND GRASP. JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR, 25, 175-192

PAILLARD, J., 1987. « COGNITIVE VERSUS SENSORIMOTOR ENCODING OF SPATIAL INFORMATION », IN P. ELLEN ET C. THINUS-BLANC (ÉD.), COGNITIVE PROCESSES AND SPATIAL ORIENTATION IN ANIMAL AND MAN, VOL. 2, NEUROPHYSIOLOGY AND DEVELOPMENTAL ASPECTS, DORDRECHT, MARTINUS NIJHOFF : 43-77.

PAILLARD, J., 1991. «THE COGNITIVE PENETRABILITY OF SENSORIMOTOR MECHANISMS: A KEY PROBLEM IN SPORT RESEARCH», INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORT PSYCHOLOGY, 22 (3-4): 244-250.

SICRE, A., LECLERCQ, S., GAUDEZ, C., GAUTHIER G. M., VERCHER, J.-L. ET BOURDIN, C., 2008. « MODELLING GAIT PROCESSES AS A COMBINATION OF SENSORY-MOTOR AND COGNITIVE CONTROLS IN AN ATTEMPT TO DESCRIBE ACCIDENTS ON THE LEVEL IN OCCUPATIONAL SITUATIONS », INDUSTRIAL HEALTH, 46 (1) : 3-14.

FITTS P.M., (1954). THE INFORMATION CAPACITY OF THE HUMAN MOTOR SYSTEM IN CONTROLLING THE AMPLITUDE OF MOVEMENT. JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY 47, 381–391.

## BIBLIOGRAPHIE

---

HOFFMANN ER. WHICH VERSION/VARIATION OF FITTS' LAW? A CRITIQUE OF INFORMATION-THEORY MODELS. *J MOT BEHAV.* 2013;45(3):205-15.

HOFFMANN, E. R. (2016). CRITICAL INDEX OF DIFFICULTY FOR DIFFERENT BODY MOTIONS: A REVIEW. *JOURNAL OF MOTOR BEHAVIOR*, 48(3), 277-288.

MACKENZIE I.S., (1992),. FITTS' LAW AS A RÉSEARCH AND DÉSIGN TOOL IN HUMAN-COMPUTER INTERACTION. *HUMAN-COMPUTER INTERACTION* 7, 91-139.

SOUKOREFF, R. W., & MACKENZIE, I. S. (2004). TOWARDS A STANDARD FOR POINTING DEVICE EVALUATION, PERSPECTIVES ON 27 YEARS OF FITTS' LAW RESEARCH IN HCI. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HUMAN-COMPUTER STUDIES*, 61(6), 751-789.

BONNETBLANC 1 2, F. (2008). CONFLIT VITESSE-PRECISION ET LOI DE FITTS. *SCIENCE & MOTRICITÉ*, (1), 63-82.

JAGACINSKI R.J.,WARD S.L., MORAN M.S (1980B), A TÉST OF FITTS' LAW WITH MOVING TARGETS. *HUMAN FACTORS*, 22, 225-233.

JAGACINSKI R.J., REPPERGER D.W., MORAN M.S., WARD S.L., GLASS B., (1980A). FITTS' LAW AND THE MICROSTRUCTURÉ OF RAPID DISCRET MOVEMENTS. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE*, 6, 309-320.

WICKENS, C. D., & PREVETT, T. T. (1995). EXPLORING THE DIMENSIONS OF EGOCENTRICITY IN AIRCRAFT NAVIGATION DISPLAYS. *JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY: APPLIED*, 1(2), 110.

CHO, K., CHO, M., & JEON, J. (2017). FLY A DRONE SAFELY: EVALUATION OF AN EMBODIED EGOCENTRIC DRONE CONTROLLER INTERFACE. *INTERACTING WITH COMPUTERS*, 29(3), 345-354.

LIN, C. J., & WOLDEGIORGIS, B. H. (2017). EGOCENTRIC DISTANCE PERCEPTION AND PERFORMANCE OF DIRECT POINTING IN STEREOSCOPIC DISPLAYS. *APPLIED ERGONOMICS*, 64, 66-74.

McNAMARA, T. P., RUMP, B., & WERNER, S. (2003). EGOCENTRIC AND GEOCENTRIC FRAMES OF REFERENCE IN MEMORY OF LARGE-SCALE SPACE. *PSYCHONOMIC BULLETIN & REVIEW*, 10(3), 589-595.

RÄDLE, R., JETTER, H. C., BUTSCHER, S., & REITERER, H. (2013). THE EFFECT OF EGOCENTRIC BODY MOVEMENTS ON USERS' NAVIGATION PERFORMANCE AND SPATIAL MEMORY IN ZOOMABLE USER INTERFACES. IN *PROCEEDINGS OF THE 2013 ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTIVE TABLETOPS AND SURFACES* (PP. 23-32).

MOTTET D., BOOTSMA R.J., (1999), THE DYNAMICS OF GOAL-DIRECTED RHYTHMICAL AIMING, *BIOLOGICAL CYBERNETICS*, 80 235-245.

FERNANDEZ, L., & BOOTSMA, R. J. (2008). NON-LINEAR GAINING IN PRECISION AIMING: MAKING FITTS' TASK A BIT EASIER. *ACTA PSYCHOLOGICA*, 129(2), 217-227.

HUYS R., FÉRNANDÉZ L., BOOTSMA,R.J., JIRSA V.K., (2010), "FITTS' LAW IS NOT CONTINUOUS IN RÉCIPROCAL AIMING." ,*PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B: BIOLOGICAL SCIENCES* 277 (1685): 1179-1184.

## BIBLIOGRAPHIE

---

JIRSA, V. K., FINK, P., FOO, P., & KELSO, J. A. S. (2000). PARAMETRIC STABILIZATION OF BIOLOGICAL COORDINATION: A THEORETICAL MODEL. *JOURNAL OF BIOLOGICAL PHYSICS*, 26(2), 85-112.

CORWIN, W.H., SANDRY-GARZA D. L, BIFERNO M.H., BOUCEK G.P., LOGAN A.L., JONSSON J.E., AND METALIS S.A., 1989, ASSESSMENT OF CREW WORKLOAD MEASUREMENT METHODS, TECHNIQUES, AND PROCEDURES. VOLUME I- PROCESS, METHODS AND RESULTS. USAF TECHNICAL REPORT WRDC-TR-89-7006, WRIGHT PATTERSON AIR FORCE BASE.

SOUKOREFF, R. W., & MACKENZIE, I. S. (2004). TOWARDS A STANDARD FOR POINTING DEVICE EVALUATION, PERSPECTIVES ON 27 YEARS OF FITTS' LAW RESEARCH IN HCI. *INTERNATIONAL JOURNAL OF HUMAN-COMPUTER STUDIES*, 61(6), 751-789.

CEGARRA J., & MORGADO N. (2009), ÉTUDE DES PROPRIETES DE LA VERSION FRANCOPHONE DU NASATLX. IN COMMUNICATION PRESENTÉE A LA CINQUIÈME ÉDITION DU COLLOQUE DE PSYCHOLOGIE ERGONOMIQUE (EPIQUE) (PP. 28-30).

KELLIS E, ARABATZI F, PAPADOPOULOS C., (2003), MUSCLE CO-ACTIVATION AROUND THE KNEE IN DROP JUMPING USING THE CO-CONTRACTION INDEX. *J ELECTROMYOGR KINESIOL ; 13: 229-238*

ERVILHA U.F., GRAVEN-NIELSEN T., DUARTE M., (2012), A SIMPLE TEST OF MUSCLE COACTIVATION ESTIMATION USING ELECTROMYOGRAPHY, *BRAZ J MED BIOL RES. 2012 OCT;45(10):977-81*

VEREIJKEN (BEATRIX), THE DYNAMICS OF SKILL ACQUISITION, AMSTERDAM, FREE UNIVERSITY OF AMSTERDAM, 1991.

VEREIJKEN (BEATRIX), WHITING (HAROLD THOMAS A.). IN DEFENCE OF DISCOVERY LEARNING, *CANADIAN JOURNAL OF SPORT SCIENCE*, 15, 1990, p.99-106.

VEREIJKEN (BEATRIX), WHITING (HAROLD THOMAS A.). IN DEFENCE OF DISCOVERY LEARNING, *CANADIAN JOURNAL OF SPORT SCIENCE*, 15, 1990, p.99-106.

LESTIENNE, F. G., & FELDMAN, A. G. (2002). UNE APPROCHE THEORIQUE DE LA PRODUCTION DU MOUVEMENT: DU MODELE LAMBDA AU CONCEPT DE «CONFIGURATION DE REFERENCE PRODUCTRICE D' ACTIONS». *SCIENCE & MOTRICITÉ*, (45), 9-43.

LATASH, M. L. (2018). MUSCLE COACTIVATION: DEFINITIONS, MECHANISMS, AND FUNCTIONS. *JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY*, 120(1), 88-104.

OLIVARI M., BÜLTHOFF H.H., NIEUWENHUIZEN F.M., POLLINI L., (2014), PILOT ADAPTATION TO DIFFERENT CLASSES OF HAPTIC AIDS IN TRACKING TASKS, IN *JOURNAL OF GUIDANCE CONTROL AND DYNAMICS* 37(6):1741-1753.

PERTERMEIJER S.M., ABBINK D.A., JOOST C. F. DE WINTER J.C.F., MULDER M., (2015), THE EFFECT OF HAPTIC SUPPORT SYSTEMS ON DRIVER PERFORMANCE, A LITERATURE SURVEY, *IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS*, VOL. 8, NO. 4

REMAUD A, GUEVEL A, CORNU C. COACTIVATION ET INHIBITION MUSCULAIRE : INFLUENCES SUR LA REGULATION DU COUPLE DE FORCE DEVELOPPE ET LES ADAPTATIONS INDUITES PAR UN ENTRAINEMENT EN FORCE [ANTAGONIST MUSCLE COACTIVATION AND MUSCLE INHIBITION : EFFECTS ON EXTERNAL TORQUE REGULATION AND RESISTANCE TRAINING-INDUCED ADAPTATIONS]. *NEUROPHYSIOL CLIN.* 2007

## BIBLIOGRAPHIE

---

JAN-MAR;37(1):1-14. FRENCH. DOI: 10.1016/J.NEUCLI.2007.01.002. EPUB 2007 FEB 12. PMID: 17418352.

BRISSWALTER JEANICK, COLLARDEAU MAYA, ARCELIN RENE. CHARGE METABOLIQUE, CHARGE COGNITIVE ET PERFORMANCE SPORTIVE. IN: LES CAHIERS DE L'INSEP, N°33, 2002. LA CHARGE DE TRAVAIL EN SPORT DE HAUT NIVEAU. PP. 115-121

CROSSMAN, E. R., & GOODEVE, P. J. (1983). FEEDBACK CONTROL OF HAND-MOVEMENT AND FITTS' LAW. *THE QUARTERLY JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY A: HUMAN EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY*, 35A(2), 251-278.

SCHMIDT, R. A., & LEE, T. D. (1999). *MOTOR CONTROL AND LEARNING: A BEHAVIORAL EMPHASIS* (3RD ED.). HUMAN KINETICS.

## **ANNEXES**

### **PARTIE 1 Questionnaire NASA-TLX**

#### **NASA – TLX**

Le questionnaire que vous allez remplir permet de déterminer la charge de travail associée à la tâche que vous êtes en train de réaliser grâce à l'importance relative de 6 facteurs.

Ces facteurs sont définis ci-dessous. Lisez-les attentivement pour être certains de comprendre chacun d'entre eux. Si vous avez des questions, n'hésitez pas à les poser aux expérimentateurs.

#### **Définitions des facteurs :**

##### **EXIGENCE MENTALE :**

Quelle quantité d'activité mentale et perceptive a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. réfléchir, décider, chercher, etc.) ?

##### **EXIGENCE PHYSIQUE :**

Quelle quantité d'activité physique a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. pousser, déplacer, tourner, manipuler etc.) ?

##### **EXIGENCE TEMPORELLE :**

Quelle pression temporelle avez-vous ressentie durant l'exécution de la tâche ? Fallait-il gérer la réalisation de la tâche de manière lente (pression temporelle faible) ou de manière rapide (pression temporelle forte) ?

##### **EFFORT :**

Quel effort (mental et physique) avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ?

##### **PERFORMANCE :**

Comment estimez-vous votre performance en ce qui concerne la réalisation de la tâche ? (Quel est votre niveau de satisfaction concernant votre performance ?

##### **FRUSTRATION :**

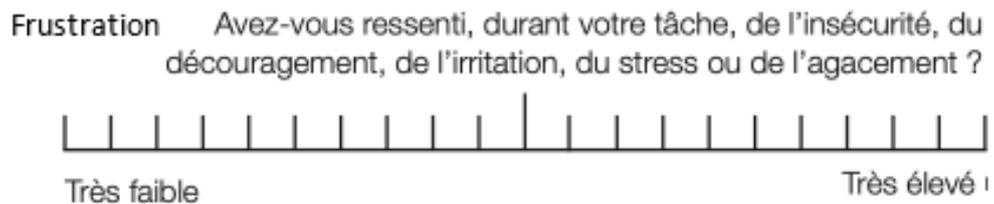
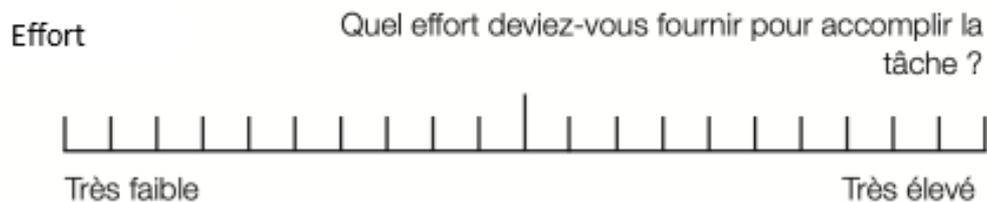
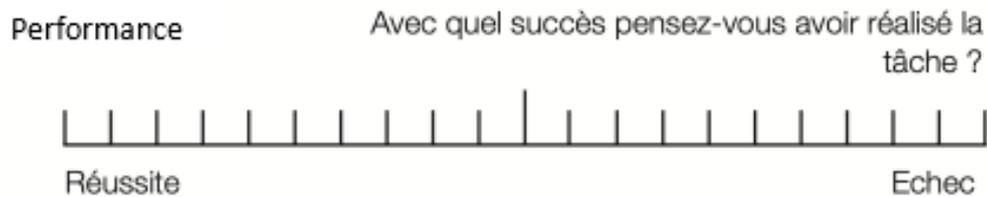
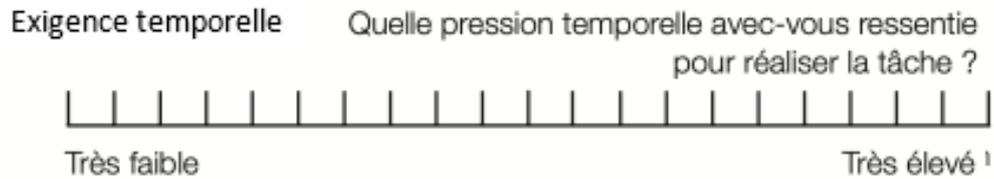
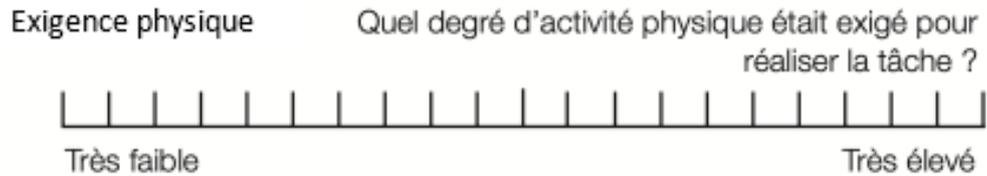
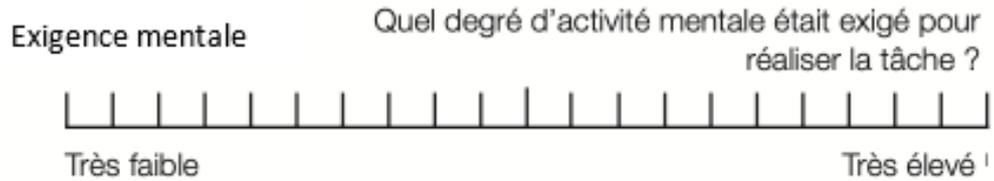
Vous êtes-vous senti satisfait, content, relaxé (= niveau de frustration faible) ou plutôt ennuyé, irrité, stressé (= niveau de frustration élevé) pendant la réalisation de la tâche ?

**Pondération Consigne :** Pour chacune de ses paires, sélectionner le facteur qui a le plus contribué à votre charge de travail pendant l'expérience.

---

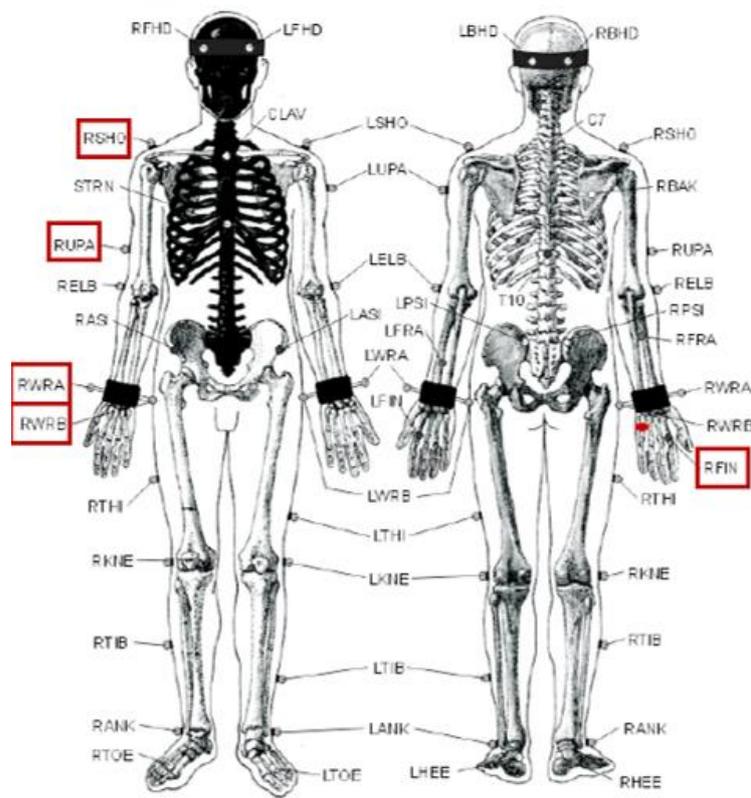
1	Exigence mentale		Exigence physique	
2	Exigence temporelle		Performance	
3	Effort		Frustration	
4	Exigence mentale		Exigence temporelle	
5	Effort		Exigence physique	
6	Performance		Frustration	
7	Effort		Exigence mentale	
8	Exigence temporelle		Frustration	
9	Exigence physique		Performance	
10	Exigence mentale		Performance	
11	Exigence temporelle		Effort	
12	Frustration		Exigence physique	
13	Frustration		Exigence mentale	
14	Exigence Physique		Exigence temporelle	
15	Performance		Effort	

---



## PARTIE 2 Placements des marqueurs de mocap

### Plug-in-Gait Marker Placement



## PARTIE 3 Le membre supérieur et son fonctionnement pour réaliser un mouvement volontaire

Cette partie permet de faire des rappels sur l'anatomie, la physiologie et la biomécanique nécessaires à la réalisation du mouvement volontaire. Il y a aura des rappels plus globaux sur les types de mouvements et les mécanismes musculaires associés spécifiquement au mouvement volontaire.

### Rappel sur le membre supérieur

Le membre supérieur est un membre poly-articulé. Il est rattaché au tronc par la clavicule et les articulations associées à l'épaule. Il permet une multitude de mouvements. Il y a 3 articulations principales : l'articulation de l'épaule, l'articulation du coude et l'articulation du poignet. Il est composé de 4 parties dont 2 segments :

- L'épaule
- Le bras allant de l'épaule au coude par l'os de l'humérus avec l'articulation de l'épaule.
- L'avant-bras allant du coude au poignet par les os du radius et de l'ulna.

## ANNEXES

---

- La main allant du poignet jusqu'aux extrémités de chaque métacarpe par les différents os de la main.

<u>Articulation</u>	<u>Degrés de liberté</u>	<u>Mouvements</u>
<i>Epaule</i>	<i>3ddl</i>	<i>Flexion/extension Abduction/adduction Rotation interne/rotation externe</i>
<i>Coude</i>	<i>2ddl</i>	<i>Flexion/extension Pronation/supination</i>
<i>Poignet</i>	<i>2ddl</i>	<i>Flexion/extension Inclinaison radial/inclinaison ulnaire</i>

## ANNEXES

Segments	BRAS	AVANT-BRAS	MAIN
OS	<i>Clavicule Scapula Humérus</i>	<i>Radius Ulna</i>	<i>Os de la main</i>
MUSCLES	<i>Biceps brachial Triceps brachial Brachial Coracobrachial</i>	<i><u>Loge antérieure :</u> Fléchisseurs radial et ulnaire du carpe Fléchisseurs supérieurs et profonds des doigts Long palmaires Carré et rond pronateur Fléchisseurs profonds des doigts Long fléchisseur du pouce <u>Loge latérale :</u> Brachioradial (ou long supinateur) Long et court extenseurs radial du carpe Supinateur <u>Loge postérieure</u> Anconé Extenseur des doigts Extenseur du V Extenseur ulnaire du carpe Extenseur de l'index Long et courts extenseurs du pouce Long abducteur du pouce</i>	<i><u>Loge Thénare :</u> Court abducteur du pouce Court fléchisseur du pouce Adducteur du pouce Opposant du pouce  <u>Loge hypothénare</u> Court palmaire Abducteur du V Court fléchisseur du V Opposant du V  <u>Loge palmaire moyenne</u>  4 lombricaux 3 interosseux palmaires 4 interosseurs dorsaux</i>

### Rappel biomécanique de la chaîne épaule-coude-poignet

L'étude de la biomécanique du membre supérieur va nous permettre d'étudier les propriétés mécaniques de cette partie du corps pour comprendre le fonctionnement du mouvement. La biomécanique permet de répondre à des questions de compréhension et/ou d'organisation du système lors de la réalisation d'un mouvement dans différentes conditions environnementales ou sous différentes contraintes (internes ou externes). Comme le décrit le livre de Paul Allard et collaborateur en il y a 4 parties pour analyser le mouvement en biomécanique :

- Une partie statique qui permet d'établir les propriétés intrinsèques du système (centre de masse, les notions de forces avec leurs directions, les moments articulaires, et de définir l'ensemble du modèle mécanique avec par exemple les différents leviers, etc.)
- Une partie cinématique qui permet d'établir les trajectoires du système défini lorsqu'il est en mouvement afin d'étudier le mouvement sans tenir compte de la cause de celui-ci.

- Une partie cinétique qui va venir ajouter les causes du mouvement par le biais des forces externes (frottement et les forces musculaire), cela permet de venir étudier ce qui est relatif à l'impulsion, le travail mécanique et l'énergie associée au mouvement.
- Une partie de dynamique inverse qui elle va venir mettre en relation la partie cinématique et la partie cinétique. Autrement dit, elle permet d'analyser le mouvement en intégrant les notions de forces.

Pour réaliser le modèle musculosquelettique du membre supérieur, nous devons décrire les différentes propriétés intrinsèques du système avec ses contraintes associées aux articulations, aux muscles mais aussi ses dynamiques. A cela s'ajoutent les propriétés extérieures au mouvement qui viennent jouer un rôle mécanique sur sa réalisation (les forces externes appliquées ou imposées, contraintes gravitationnelles de l'environnement, contrainte inertielle).

Dans un premier temps, nous devons comprendre comment sont articulés les différents segments du membre supérieur. Nous allons regarder en détail les différentes articulations qui le composent.

Nous allons décrire l'articulation de l'épaule constituée de trois sous-unités articulaires :

- L'articulations gléno- humérale,
- L'articulation acromio-claviculaire
- L'articulation sterno-claviculaire.

C'est une articulation très complexe et nous ne rentrerons pas dans les détails de celle-ci.

Pour l'articulation du coude qui est entre le bras et l'avant-bras. Il y a 3 degrés de liberté au niveau du coude (i.e unité articulaire) qui sont la flexion (avec une amplitude moyenne de 150°), l'extension et la prono-supination. Le coude est constitué de trois unités articulaires au coude :

- L'articulation huméro-ulnaire (trochlée humérale + ulna)
- L'articulation huméro-radial (capitulum et tête radial) permet les mouvements de flexion et d'extension du coude.
- L'articulation radio-ulnaire proximale (contact proximale entre ulna et radius) permet des mouvements de pronosupination associés à l'articulation radio-ulnaire distale du poignet.

La mobilité du coude se fait par le muscle du biceps brachial et brachial antérieur pour la flexion et le triceps brachial pour l'extension. Les mouvements de pronation par le muscle rond pronateur et la supination par le biceps brachial et le muscle brachio-radial.

Enfin, l'articulation du poignet qui permet les mouvements entre l'avant-bras et la main. Il y a 3 unités articulaires au niveau du poignet :

- L'articulation radio-carpienne entre le radius et la première rangée des os du carpe.
- L'articulation médio-carpienne entre la première et la deuxième rangée des os du carpe.  
Ces deux articulations sont à l'origine des mouvements de flexions et d'extensions du poignet et des mouvements d'inclinaison latérale (radial ou ulnaire).
- L'articulation radio-ulnaire distale entre l'extrémité inférieure du radius et la tête de l'ulna qui permet les mouvements de rotations de la main (i.e. de pronation et de supination de la main).

Concernant les propriétés extérieures au mouvement qui viennent influencer la biomécanique du membre supérieur, elles sont multiples et elles sont dépendantes de l'environnement que nous imposons.

Dans notre cas, nous allons nous intéresser spécifiquement à l'influence de l'inertie, la vitesse via la viscosité.

Dans le cadre des travaux de la thèse, nous ne nous intéresserons qu'aux articulations du coude et du poignet, car l'articulation de l'épaule est plus complexe et a moins d'utilité pour les mouvements de pronation/supination étudiés. Nous allons détailler comment est réalisé le mouvement en termes physiologiques qui viennent compléter le modèle mécanique pour aboutir au modèle biomécanique complet du membre supérieur.

### **Rappel sur les mouvements associés au membre supérieur**

#### **Définition des différents types de mouvements.**

- Le membre supérieur permet une multitude de mouvements qui ont des caractéristiques propres. Ces mouvements sont de différents types et permettent différentes mobilités du membre supérieur, nous avons 4 couples de types de mouvements principalement :
- -Flexion/Extension: La flexion permet de diminuer l'angle articulaire en mouvement en rapprochant les deux segments qui constituent l'articulation. L'extension augmente l'angle articulaire et éloigne les deux segments qui constituent l'articulation.
- -Abduction /adduction: L'abduction est le mouvement de rotation qui permet d'éloigner un segment de l'axe longitudinal du corps tandis que l'adduction est le mouvement de rotation qui rapproche un segment de l'axe longitudinal du corps.

- -Rotation externe/rotation interne : spécifique à l'épaule et la hanche. Nous avons dans ce mouvement une rotation de l'os autour de son axe longitudinal dans un plan transversal.
- -Pronation/supination : spécifique à l'avant-bras. La supination représente un mouvement de rotation avec une fin de mouvement la paume vers le ciel (aide mnémotechnique : action de supplier). La pronation représente un mouvement de rotation avec une fin de mouvement la paume vers le sol (aide mnémotechnique : action de prier).

### **Rappel sur le fonctionnement musculaire d'un mouvement volontaire**

Les mouvements sont effectués par l'intermédiaire de différents acteurs qui sont les muscles, les articulations et les nerfs.

Nous pouvons considérer que nous sommes constitués d'un squelette qui est un ensemble d'os rigides que l'on peut nommer segment corporel. Pour effectuer un mouvement, il existe des zones de contact des os qui permettent que les segments s'articulent entre eux, ce que l'on appelle des articulations. Les muscles sont fixés à ces segments par des tendons qui rattachent les muscles à l'os. Il y a des nerfs qui viennent innover les muscles pour déplacer les segments afin de réaliser le mouvement.

#### **Les différents types de muscles**

Les muscles sont pairs et symétriques (identiques à droite et à gauche) sauf pour les muscles associés à des organes. Chaque extrémité du muscle est attachée par une origine ou une insertion. L'origine permet de lier le muscle à l'os qui reste fixe, tandis que l'insertion permet d'attacher le muscle à l'os qu'il met en mouvement. Il peut y avoir des tendons entre l'os et le muscle dans ce cas l'attache sera indirecte. Cette organisation permet de réaliser des mouvements au niveau d'une articulation.

Nous pouvons catégoriser les muscles en deux types :

- **Muscles profonds ou squelettiques** qui sont rattachés à l'ossature (ce sont les plus nombreux), ils permettent les mouvements et les postures. Il existe aussi du muscle rattaché à un cartilage.
- **Muscles superficiels** (ou peauciers) dont l'une des extrémités est rattachée à du derme.

#### **Les différentes caractéristiques de muscles**

Les muscles possèdent 4 caractéristiques principales : leur excitabilité (i.e. réaction à la stimulation du système nerveux), leur contractilité (i.e. propriété du tissu musculaire à pouvoir se contracter pour produire un mouvement), leur élasticité (i.e. propriété du tissu musculaire à pouvoir reprendre sa forme initiale lorsqu'il n'y a pas ou plus de contraction musculaire), leur tonicité (i.e. propriété du tissu musculaire à garder un certain tonus musculaire permanent).

Le muscle est associé à un système mécanique qui est sujet aux lois de la physique, avec différentes forces qui vont être présentes dans ce système :

-La force de contraction (on a uniquement une contraction dans le sens de la longueur).

-Les forces élastiques :

- **Sériée** : Cette force va permettre une augmentation de la raideur avec l'augmentation de la force via le raccourcissement des sarcomères, C'est une énergie qui ne consomme pas d'ATP, uniquement restituée dans certains types de mouvement. Cette élasticité permet de transmettre la force aux structures osseuses nécessaires pour réaliser le mouvement.
- **Parallèle** : Ce type de force permet que lorsque le muscle n'est pas en condition contractée, il va pouvoir résister à un allongement en développant une force passive. Cela se traduit par une augmentation de la raideur du muscle avec l'augmentation de l'allongement de celui-ci.

Une façon de voir le muscle est le un système masse ressort avec le modèle de Hill, avec 3 composantes : une composante contractile, une composante élastique sériée et une composante élastique parallèle.

### **Production du mouvement : La contraction musculaire**

Pour produire un mouvement, il faut que le muscle soit innervé. L'innervation du muscle passe par des motoneurones qui sont des neurones qui permettent de faire passer l'information du système nerveux vers le système musculaire. Le corps cellulaire du motoneurone est de manière générale dans la moelle épinière (pour ceux qui contrôlent les muscles squelettiques). La terminaison axonique vient se faire sur une fibre musculaire. Généralement la jonction neuromusculaire se fait au niveau des invaginations de la membrane plasmique des fibres musculaires (i.e. la membrane sarcoplasmique). On définit la jonction neuromusculaire, c'est à dire le point d'interaction entre le système nerveux et le système musculaire. Le principe de base de la communication nerveuse est l'envoi d'un signal électrique qui va parcourir l'axone pour arriver au niveau de la terminaison synaptique pour finir par exciter ou inhiber des cellules musculaires pour réaliser l'action souhaitée.

L'ensemble du motoneurone et de la fibre musculaire est appelé unité motrice (UM). *Le motoneurone est le neurone qui innerve plusieurs cellules musculaires qui forment l'unité motrice.* Généralement, un motoneurone ne s'articule pas sur une seule fibre mais sur plusieurs fibres musculaires (au bout de l'axone des ramifications vont permettre d'aller sur plusieurs fibres musculaires). Le nombre de motoneurones va dépendre de la finesse de l'action à réaliser. Par exemple pour bouger le doigt on a un rapport de 1 motoneurone pour 10 fibres musculaires, pour un biceps on a un rapport de 1 pour 100 ou 1 pour 200 car on n'a pas besoin de finesse dans le mouvement.

L'activité musculaire découle de l'activation d'un motoneurone alpha, qui va engendrer un courant électrique le long du nerf moteur, qui va venir libérer des transmetteurs (i.e. petites particules) au niveau des plaques motrices. Cette dépolarisation est appelée potentiel d'action musculaire (ou potentiel de plaque motrice), faisant passer la membrane de la cellule musculaire de  $-70\text{mV}$  à  $+30\text{mV}$ . A partir de la plaque motrice, le potentiel d'action va se propager le long de la fibre musculaire à une vitesse de 1 à 5m/s avec une amplitude moyenne de 100mV. Ce potentiel d'action musculaire va engendrer des modifications moléculaires des fibres composants des fibres musculaires pour aboutir à une contraction musculaire (ou secousse musculaire).

La force exercée par le muscle via l'action du système nerveux centrale est dépendante du recrutement des unités motrices et de la fréquence de décharge des unités motrices. Nous appelons cela le recrutement spatial ou temporel des unités motrices. La force peut être influencée par la longueur du muscle et la vitesse de variation de la taille du muscle. Si, on augmente la stimulation nerveuse sur une même unité motrice, on va faire une sommation des potentiels d'action musculaire, c'est-à-dire que les potentiels d'actions vont en quelque sorte s'ajouter. La somation va augmenter l'amplitude et la durée de la contraction. Au niveau d'un muscle entier, la force de contraction sera dépendante de la stimulation qu'elle va recevoir et du nombre d'unités motrices qu'on va recruter.

Selon le type de mouvement souhaité l'activation du couple musculaire va être différente. Il existe différents types de contractions musculaires :

- **Contraction isotonique (deux types)** représente une contraction du muscle avec déplacement (i.e. allongement ou raccourcissement du muscle) sans modification de la tension (i.e. force constante). Nous avons soit du travail actif /positif avec raccourcissement concentrique soit du travail négatif/résistant avec allongement excentrique.
- **Contraction excentrique** (ou *allongement du muscle*) représente une augmentation de la longueur du muscle, alors que la force développée par le muscle est constante ou augmente. C'est du travail négatif ou résistant.
- **Contraction concentrique** (ou *raccourcissement du muscle i.e. rapproche les os*) représente une diminution de la longueur du muscle, alors que la force développée par le muscle est constante ou augmente. C'est du travail positif ou actif.
- **Contraction isométrique** représente une contraction du muscle avec une longueur du muscle constante alors que la force développée par le muscle augmente.
- **Contraction isocinétique** représente un muscle qui se contracte en se raccourcissant ou s'allongeant à vitesse constante.

Tous les muscles de l'organisme sont organisés en paire. Chaque paire de muscles comprend un muscle agoniste et un muscle antagoniste. Nous appelons les muscles agonistes, les muscles qui par une contraction concentrique permettent la réalisation du

mouvement souhaité. Les muscles antagonistes sont les muscles qui génèrent une contraction (ou force élastique) contraire à celui souhaité. Par exemple, lorsque nous attrapons une bouteille d'eau nous contractons le biceps brachial qui se raccourcit pour effectuer une flexion. Il existe aussi des muscles synergiques qui eux vont avoir une action commune pour favoriser un même mouvement sans pour autant le réaliser (donc ils renforcent ou limitent l'action i.e. aident et appuient l'action des muscles agonistes ou empêchent les mouvements indésirables).

### **Mouvements volontaires vs mouvements réflexes**

Dans ces différents types de mouvement il y a plusieurs façons d'exécuter le mouvement. Il peut être produit de façon volontaire ou involontaire (reflexe).

Les mouvements volontaires sont issus d'une commande motrice (ou influx nerveux) envoyée par le cerveau qui va partir de l'aire motrice primaire (ou cortex moteur) va cheminer par les neurones pyramidaux vers la moelle épinière. Les terminaisons des neurones de la moelle épinière font une synapse avec les motoneurones des muscles. Selon l'intensité de l'influx du neurone présynaptique une quantité de neurotransmetteur va être libérée dans la fente synaptique et les neurotransmetteurs vont se fixer sur le motoneurone pour transmettre l'influx nerveux aux fibres musculaires.

On va donc avoir un stimulus sensoriel qui engendre une action des récepteurs qui va transmettre des informations d'un neurone sensitif au système nerveux central (i.e. SNC) qui va intégrer les informations (cerveau ou moelle épinière selon le type de reflexe) et transmettre une réponse motrice aux muscles.

Nous avons des mouvements réflexes et des mouvements volontaires. Les premiers sont régis par des mécanismes réflexes inconscients au niveau de la moelle épinière avec peu d'intervention des centres supérieurs (encéphale i.e. cerveau, cervelet, tronc cérébral). Ces mécanismes engendrent des réponses musculaires automatiques et stéréotypées suite à une situation particulière. Par exemple, retirer sa main quand on a touché quelque chose de brûlant, mettre les mains en avant quand on va faire une chute.

Les seconds sont des mouvements conscients qui sont régis par le cerveau avec une conscience de vouloir faire le geste (idée ou sensation). Cette volonté se traduit par une commande qui part du cerveau qui va transmettre un message nerveux vers les muscles pour accomplir une action/un geste. Par exemple, saluer quelqu'un, prendre une bouteille d'eau.

## **PARTIE 4 Matériels et méthodes complémentaires pour les expériences de laboratoire**

### **Systeme du simulateur visuel**

- **Modèle ConfigSimulation** : Il permet l'affectation de variables choisies avant le début de la simulation. Il nous permet de choisir en entrée le type de gain appliqué

---

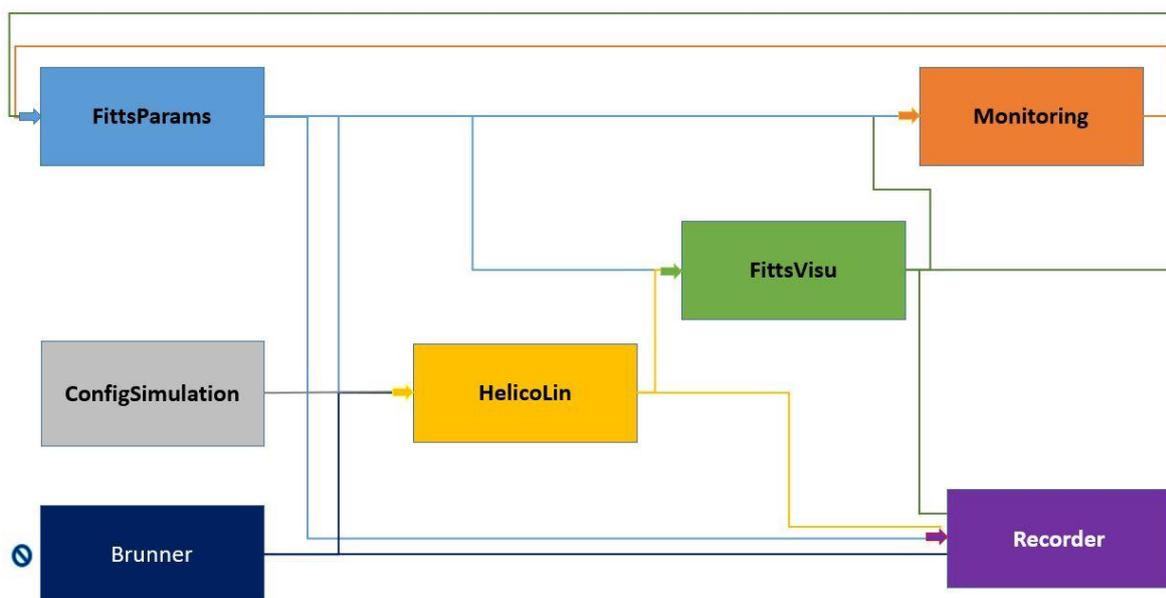
et le mode de contrôle au manche (position/ vitesse). Il communique avec le modèle HelicoLin.

- **Modèle Brunner** : Il permet de récupérer la position courante physique du manche ainsi que les forces appliquées. Il reçoit en entrée les consignes d'efforts et de positions appliquées au manche, ainsi que le mode de contrôle associé au manche via ConfigSimulation et il communique avec les modèles HelicoLin et Recorder pour les variables suivantes : déplacement du manche Brunner en x et y (radian en P de déplacement de la course globale du manche avec 50 (+/-) la précision du manche en radian), avec 0 à gauche et 100 à droite, effort du manche en latérale (N), effort du manche en longitudinal (N).
- **Modèle FittsParam** : Il contient une liste de fichiers qui contient chacun les paramètres pour l'ID de familiarisation ou de passation associée. C'est ce modèle qui gèrera si oui ou non il y aura répétition des essais manqués, le % min et max de réussite nécessaire, si le rejeu se fait à la fin ou tout de suite, etc. Il donne les positions des cibles et lance/arrête le visuel. Il va lire un fichier avec la liste des essais (familiarisation ou pas) qu'il faut faire. Puis, il va lire chacun des fichiers de la liste pour construire une matrice de paramètres d'essais FittsParam envoi une info au FittsVisu à la fin de chaque ID pour arrêter le fichier et en commencer un nouveau. Les noms seraient soit génériques (date + heure de départ) soit modifiés pour que l'on fournisse le nom du fichier. Il communique en sortie avec les modèles HelicoLin, FittsVisu et Monitoring pour les variables suivantes : CurrentRunNB, CurrentSerie, CurrentRuninSerie, Position Cible Gauche, Position Cible Droite, RunTime, Taille Cible, Distant Cible.
- **Modèle HelicoLin** : C'est le modèle utilisé dans la scène virtuelle. Il fournit les déplacements du mobile dans la scène virtuelle. Il permet de régler les paramètres propres et de récupérer les déplacements associés (Il est à noter qu'il ne prend pas en compte les propriétés de masse, d'inertie et de mécaniques du vol de ce type d'aéronef. Il est codé en C++ selon le « standard » des modèles Colosse. Le modèle est donc sans inertie, avec une masse négligeable proche d'un cube sans frottement). Il est chargé de gérer le déplacement de l'objet virtuel « Hélicoptère » à 100Hz), le déroulement des séries d'essais et les calculs de réussites de la tâche et des efforts des appliqués au manche en latérale et en longitudinale (en Newton), ainsi qu'une sous fonction pour choisir le mode de contrôle du manche (position vs vitesse). Il communique en entrée avec les modèles Brunner, FittsParam, ConfigSimulation et en sortie avec FittsVisu et Recorder avec les données de déplacement de l'objet virtuel en x et y en millimètres (mm).
- **Modèle FittsVisu** : Il affiche dans une scène 2D la position à chaque instant de l'objet virtuel, des cibles et chronomètre du temps effectué à la fin de chaque essai, mesure le pourcentage de réussites qui est affiché dans le monitoring. Sachant que pour le référentiel géocentré les cibles sont espacées de 700 mm entre le centre des deux cibles et pour le référentiel égocentré de 800mm. Le pointeur dans les deux conditions fait 8mm de large pour 20mm de hauteur. La taille des cibles varie en fonction du référentiel et de l'ID (voir le tableau 2). La hauteur des cibles étaient identiques et fixe à 500mm et les paramétrages identiques pour chaque mode de contrôle. Il communique en entrée avec HelicoLin et FittsParam et en sortie avec FittsParam, Monitoring, Recorder avec les variables : Gate Ok, GateTotale, TrimBrunner.

Tableau : Paramétrage expérience pour les deux référentiels.

Indice de difficulté (ID)	Référentiel Géocentré (taille cible en mm)	Calcul ID	Référentiel Egocentré (taille cible en mm)	Calcul ID
ID1	160	3.13	200	3
ID2	100	3.81	100	4
ID3	70	4.32	70	4.51
ID4	40	5.13	50	5.32
ID5	25	5.81	25	6

- **Modèle Monitoring** : Il permet de recueillir le nombre de portes valides, le pourcentage de réussite, le chronomètre et la gestion des séries ; il a une fonction d'affichage comme le modèle FittsVisu. Il communique en entrée avec FittsParam et FittsVisu et en sortie avec FittsVisu pour la variable de calcul du pourcentage de réussite.
- **Modèle Recorder** : Il permet l'enregistrement des variables d'intérêt du fichier au format comma-separated values (csv). Il communique en entrée avec les modèles Brunner, FittsParam, HelicoLin, FittsVisu. Il récupère les paramètres des essais par FittsParam, les positions de l'objet virtuel (hélicoptère simplifié) et des cibles via FittsVisu, les positions et forces au manche via le Brunner, etc. pour les variables : nom de fichier, temps réel, temps théorique, temps de chaque essai via chronomètre, début et fin du simu (par booléen), indice de session (Série, ID, essai), indice mode de contrôle (position vs vitesse), positions cibles, nombre de portes validées, pourcentage de réussite, déplacement du mobile (x, y, z), déplacement du manche (x, y, z), forces appliquées au manche.



*Figure annexe 2 : Schéma de la connectivité des différents modèles imbriqués pour la simulation finale de l'expérience.*

## **PARTIE 5 Matériels et méthodes complémentaires pour les essais en vol**

### **Rappel des deux manœuvres (MTE) réalisées**

- **Side step**: manœuvre agressive qui est un aller/retour. Elle s'apparente à un hélicoptère caché derrière un bâtiment qui sort rapidement cible le point de mire et tire et revient rapidement se remettre derrière le bâtiment.
- **Lateral repositoning** : manœuvre moins agressive qui est d'un aller. Elle consiste à déplacer notamment des charges d'un point A à un point B avec grande précision. !! Certaines manoeuvres vont de droite à gauche ou de gauche à droite.

## **Rappel des commandes de vol de l'hélicoptère**

### **Les types de commande de l'hélicoptère :**

- Manette des gaz : elle permet de donner plus de puissance à l'appareil.
- Palonnier (pédales au pied) qui permet de contrôler le cap (axe lacet).
- Le manche cyclique (ou manche à balais, situé entre les jambes du pilote il ressemble à un joystick contrôlé avec la main droite) : permet le contrôle de l'inclinaison (axe de roulis) et l'assiette de l'hélico (axe de tangage).
- La collectif (ou levier de pas, lui est situé à gauche du pilote et ressemble à un manche de frein à main contrôlé avec la main gauche) : permet de contrôler le contrôle haut/bas de l'hélico par le contrôle de l'angle de pas de toutes les pales du rotor qui induit des modifications de portance.

### **Définition de la manœuvre de « Side Steps »**

Objectifs de la manœuvre tel qu'ils sont décrit dans l'ADS-33 traduit en français :

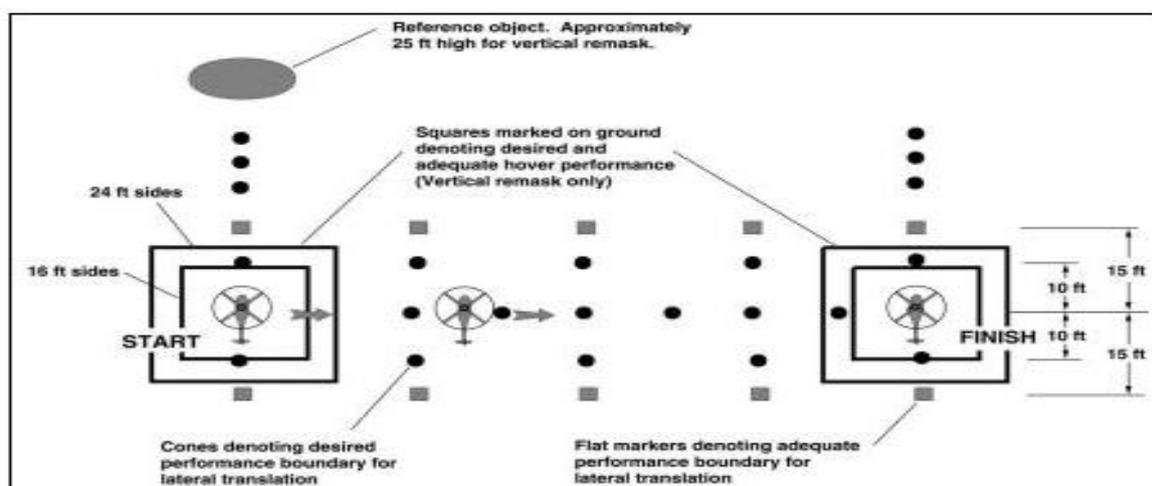
- Vérifier les qualités de maniabilité latérale en vue de manœuvres agressives proches des limites de performance du giravion (GVE) ou de manœuvres latérales raisonnablement agressives (DVE).
- Des performances du giravion (GVE) ou des manœuvres latérales raisonnablement agressives (DVE).
- Vérifier l'absence de couplage inter-axe inacceptable.
- Vérifier la capacité à coordonner l'angle d'inclinaison et le collectif pour maintenir une altitude constante.

### Description de la manœuvre

A partir d'un vol stationnaire stabilisé avec l'axe longitudinal du giravion orienté à 90 degrés par rapport à une ligne de référence marquée au sol, amorcer une accélération latérale rapide et agressive, en maintenant l'altitude constante avec la puissance. Maintenir la vitesse cible pendant 5 secondes, puis amorcer une décélération agressive jusqu'au vol stationnaire à altitude constante. L'angle d'inclinaison maximal pendant la décélération devrait se produire juste avant que le giravion s'arrête. Établir et maintenir un vol stationnaire stabilisé pendant 5 secondes. Il faut immédiatement refaire la manœuvre dans la direction opposée. Pour un cockpit avec des sièges côte à côte, le pilote d'évaluation doit pouvoir s'asseoir sur l'un ou l'autre siège afin d'évaluer les effets néfastes potentiels du repérage sur l'évaluation des qualités de vol.

### Description du parcours d'essai

Le parcours d'essai est constitué de toutes les lignes de référence ou de tous les repères au sol indiquant la trajectoire souhaitée et les tolérances pour l'accélération et la décélération, ainsi que des marqueurs indiquant le point de départ et la fin de l'essai de la manœuvre. Établir et maintenir un vol stationnaire stabilisé pendant 5 secondes. Il faut répéter immédiatement la manœuvre dans la direction opposée. Pour un cockpit avec des sièges côte à côte, le pilote d'évaluation doit pouvoir s'asseoir sur l'un ou l'autre siège afin d'évaluer les effets néfastes potentiels du repérage sur l'évaluation des qualités de vol. Le parcours devrait également comprendre des lignes de référence ou de référence parallèles à la ligne de référence de la trajectoire pour permettre au pilote et aux observateurs de percevoir les performances souhaitées et adéquates de la trajectoire longitudinale, telles que la vitesse de l'avion, comme l'exemple illustré à la Figure 32.



*Figure annexe 3 : Schéma de la manœuvre de Side Steps de l'ADS-33*

## Matériels et maquettages

Pour cette expérience terrain, nous avons utilisé les dispositifs embarqués suivants :

- Un système DELSYS Trigno Wireless avec 12 capteurs 2 Trigno Quattro sensor et 4 Avanti sensor (*DELSYS INCORPORATED, 23 Strathmore Road, Natick, MA 01760, USA*) pour l'acquisition de l'activité EMG.
- Un système X-SENS MVN Awinda 7 IMU avec 3ddl de traceur de mouvement (*XSENS INCORPORATED, Pantheon 6-A + 8A, 7521 PR Enschede, Pays-Bas*) pour l'acquisition de la cinématique du mouvement via des IMU. Leur dimension est de 47 x 30x13 mm.

L'ensemble de ces systèmes émet à une radio fréquence de 2,4 à 2,483 GHz ISM Band (Proprietary RF Protocol, BLE V4.2). Ils ont été synchronisés grâce à la mise en place d'un protocole Network Time Protocol (NTP) sur l'ordinateur d'acquisition. Ce protocole permettait d'avoir le même temps GPS entre l'ordinateur d'acquisition, le GPS du Fennec et l'ordinateur de bord. Pour l'acquisition de ces mesures, nous avons utilisé un ordinateur portable Dell Latitude 5520 de 15 pouces permettant la mise en place des logiciels respectifs des dispositifs cités au-dessus. Les dimensions de l'ordinateur sont : largeur 38cm et profondeur 25cm.

Les pilotes étaient assis dans l'hélicoptère dans une position classique de pilotage i.e. jambes atteignant les palonniers et avant-bras sur la cuisse pour manipuler le manche cyclique. Il est à noter que l'ensemble de ces équipements ne vient pas interférer entre les actions du pilote avec l'aéronef et n'est pas physiquement lié à l'hélicoptère.

Les participants ont été équipés :

- De capteurs EMG au niveau des deux couples musculaires d'intérêt (biceps/triceps ; muscle brachio-radial/muscle rond pronateur).
- Des IMU respectivement sur le centre des mains, le centre du radius (des deux avant-bras), le centre de l'humérus (des deux bras), les trapèzes, le sternum.

L'activité électromyographique et cinématique étaient enregistrées de façon synchrone à une fréquence d'acquisition de 1000Hz. La pose des capteurs EMG est faite selon les recommandations de la SENIAM. La peau de chaque pilote a été nettoyée et rasée à l'endroit où était positionnée chaque électrode. Les capteurs n'empêchent pas les pilotes de remettre leurs habits ignifugés ainsi que leurs combinaisons de vol après appareillage.

Pour l'acquisition des données GPS de l'hélicoptère et de sa cinématique, nous avons les données acquises directement au travers de l'installation d'essais en vol présentes dans l'hélicoptère (déjà intégrées à l'hélicoptère) ainsi que les positions des commandes de vol (palonnier, manche cyclique et le collectif) auxquelles nous avons ajouté un GPS supplémentaire (GPS i5000). Ces données GPS nous permet de récupérer la cinématique de l'appareil. Nous avons récupéré les enregistrements audios des vols ainsi que les tops utilisés dans les fichiers acquis dans le système de l'hélicoptère pour les indications de début et fin d'essai. Parallèlement, nous avons défini les mêmes triggers au sein du logiciel d'acquisitions EMG/XSENS.

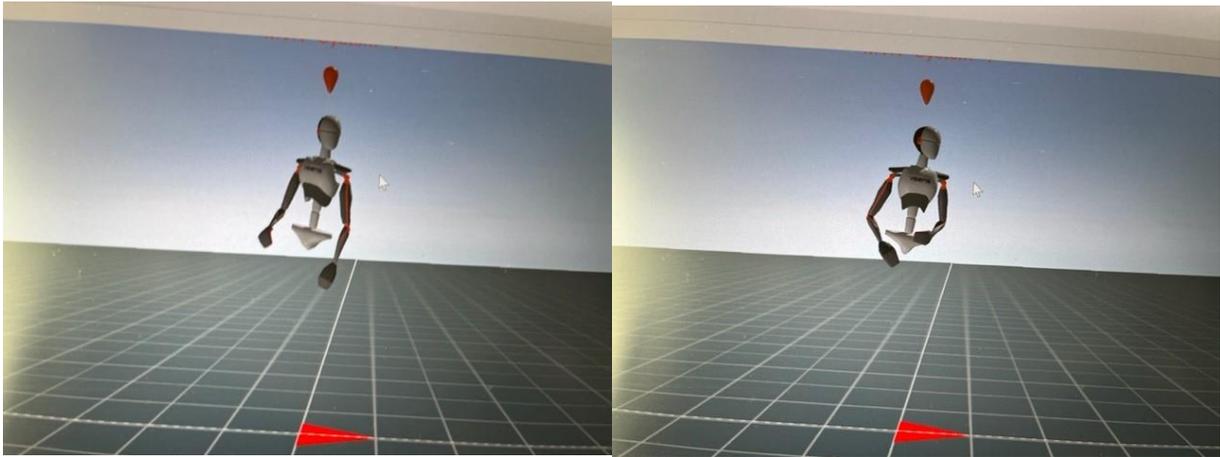
Nous avons pris soin préalablement de synchroniser nos dispositifs aux données GPS de l'hélicoptère, en intégrant un protocole Network Time Protocol (NTP) permettant de faire une synchronisation de la date et de l'horloge de l'ordinateur portable à un serveur local. Nous avons vérifié le delta entre le temps système de notre pc et du système embarqué intégré à l'hélicoptère.

Pour enregistrer les mouvements du bras droit, nous avons besoin de placer 11 centrales inertielles sur l'ensemble du haut du corps du pilote :

- Une sur chaque dos des mains (2)
- Une sur chaque avant-bras (2)
- Une par bras (2)
- Deux au niveau des omoplates (2)
- Une au niveau du sternum (1)
- Une au niveau des lombaires (1)
- Un au niveau de la tête (1)



*Figure annexe 4 : Centrales inertielles XSENS*

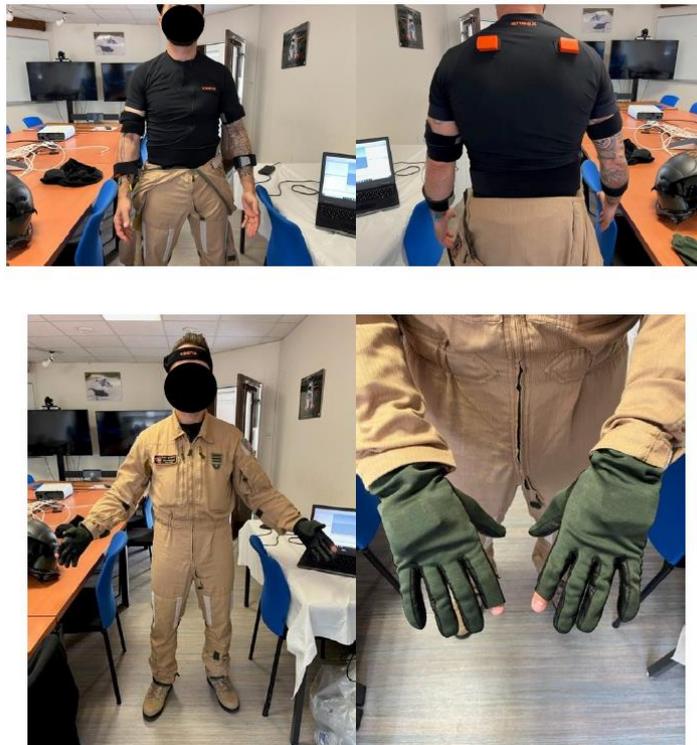


*Figure annexe 5 : Logiciel XSENS pour l'acquisition des données des IMU et du système DELSYS.*

Les centrales inertielles sont associées à un logiciel qui permet d'enregistrer les données et de visualiser en 3D et en temps réel les mouvements de la personne les portant.

### **Maquettage du pilote**

Après avoir équipé un pilote, voici le dispositif en place.



*Figure annexe 6 : Pilote équipé de l'ensemble des systèmes XSENS et DELSYS.*

Un pilote d'essai de DGA-EV a été équipé du matériel et s'est installé à bord d'un Fennec puis d'un Dauphin, aéronefs pressentis pour réaliser la campagne d'essais, afin de vérifier qu'aucune gêne n'était rencontrée.

Le pilote équipé n'a pas relevé de gênes particulières, cependant certains points sont à noter :

- Le T-shirt est en matière synthétique de la Figure 4 a été remplacé par un t-shirt coton ignifugé avec du velcro pour fixer les IMU.
- Seul le type de gants présentés sur la photo peuvent être enfilés avec les capteurs. Les autres se sont avérés trop serrés. Même si le pilote arrive à les enfiler avec le capteur, cela génère un inconfort jugé trop important pour les vols d'essais.
- Le bandeau ne pouvant pas être mis avec le casque, le capteur de la tête sera fixé à l'arrière du casque avec du velcro et mis dans un filet en coton pour la sécurité en cas de chute de l'IMU durant le vol.
- Les capteurs EMG (non visibles sur la photo de la Figure 4) ont également été mis en place sur le pilote pour le maquettage. Le pilote a jugé leur installation compatible pour le vol d'essais et n'a pas relevé de gêne particulière.

### **Maquettage des dispositifs pour les essais**

Dans le cadre de cette expérience, nous souhaitions mesurer l'activité musculaire et les mouvements du bras droit d'un pilote lors de MTE avec une variation de la difficulté (avec et sans lunettes DVE). Le but est d'étudier comment ces mesures évoluent avec la charge cognitive et de comparer des critères objectifs, calculés à partir de ces mesures, à un critère subjectif qui est la notation Cooper-Harper.

Le but de ce maquettage était de définir l'installation des matériels dans la mallette et la manière et le lieu de fixation de la mallette à bord du Fennec.

- La campagne a fait l'objet de 2 vols avec 2 pilotes (1 pilote équipé des capteurs/lunettes DVE + 1 pilote de sécurité), un conducteur d'essai (i.e. CE) et un opérateur en cabine.
- Le PC restera tout le long du vol dans la mallette. La mallette était fermée durant les phases critiques du vol (décollage et atterrissage), elle était ouverte le reste du vol.
- En cas d'emballement thermique, le CE était chargé d'extraire la mallette complète à l'extérieur (procédure détaillée dans le programme d'essais). Pour faciliter l'extraction, la tension des sangles devait être adaptée par le CE lors de la mise en place.
- Le siège arrière centre-gauche ne devait pas être occupé car l'anneau de fixation de sa ceinture était utilisé pour sangler la mallette.
- Il fallait être vigilant au cheminement des sangles sous le siège afin de ne pas endommager le matériel.

## Fiches techniques des dispositifs

Système de motion capture par IMU :

Système XSENS MVN Awinda avec logiciel MVN Analyse.

Il permet de faire des acquisitions jusqu'à 1000HZ sur une durée de 6 heures et dans des températures comprises entre 0 et 50 °C. Le matériel doit être en communication avec une clé USB-dongle (2.4 GHz).

Un PC portable a été embarqué sans intégration à la machine afin d'enregistrer les données des capteurs présentés précédemment. Ce PC portable a été placé dans une mallette mesurant 21 cm de long, 15cm de large et 7.5cm d'épaisseur (fermée). Le PC portable a été placé dans la mallette de façon à être facilement décroché en cas d'emballage thermique de sa batterie par du velcro 3M et une pochette anti-feu a été embarquée parallèlement. Des plaques ont été mises pour renforcer la mallette suite à l'étude de crash pour attacher cette dernière dans l'hélicoptère avec des mousquetons et sangles permettant de supporter 6G à l'arrachement.



*Figure annexe 7 : Mallette fermée qui contiendrait l'ensemble des dispositifs à embarquer.*

Un GPS (33-2710NM-00-300 Tallysman wireless) associé à une IMU (ELLIPSE 2-N-G4A3-B2 SBG systems) ont été embarqués afin de récupérer les données GPS pour synchroniser les données des systèmes aux données enregistrées par l'hélicoptère.

Cela nous a permis d'avoir une synchronisation des data enregistrés sur l'ordinateur en fonction du temps GPS avec celles enregistrées par l'hélico (temps GPS) grâce au protocole NTP. L'antenne GPS est associée à une IMU les deux dispositifs seront branchés sur un port USB du PC et accrochés de façon fixe à un support dans la mallette.



*Figure annexe 8 : Photographies de l'antenne GPS et de l'IMU associé ainsi que le câble USB.*

### Pour résumer le matériel embarqué

En résumé dans la mallette il y avait :

- Le pc d'acquisition
- L'antenne GPS associée à une IMU et le tout relié par un câble USB
- Le dongle USB de transmission du système et la clé UBS de licence.

Et nous avions sur le pilote :

- Les centrales IMU du système XSENS (velcro sur la combinaison ignifugé et 1 sur le casque).
- Un capteur électromyographique quatre du système DELSYS Lite sur le bras droit (muscles : biceps/triceps et muscle brachio radial/rond pronateur).

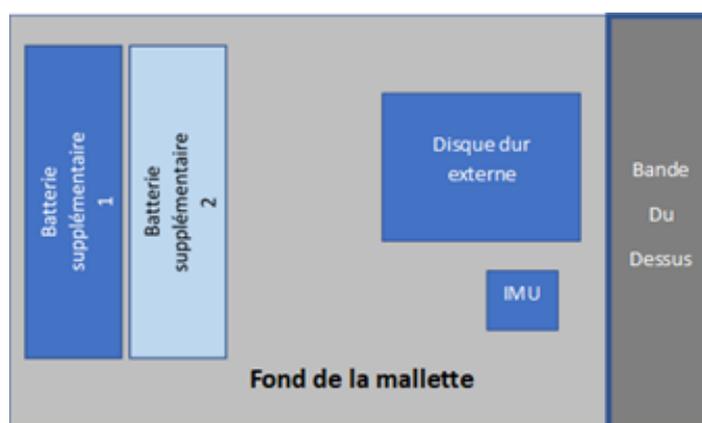
### **Maquettage de l'installation dans la mallette d'acquisition dans l'hélicoptère**

Le matériel embarqué pour ces essais était contenu dans une mallette (9kg au total) : un ordinateur portable, les deux antennes associées aux capteurs placés sur le pilote, un hub USB, un disque dur et deux batteries supplémentaires. Ces matériels sont décrits dans le programme d'essais.

L'ordinateur était fixé à la mallette par du velcro 3M (réf SJ3550). Les antennes, placées sur le dos de la mallette, sont fixées par des vis freinées (avec frein filet). La plaque sous l'ordinateur (Figure 1) peut s'ouvrir et l'ensemble des câbles, le disque dur et les batteries seront placés en dessous et fixés par du velcro.



*Figure annexe 9 : Maquettage mallette finale après modification mallette.*



*Figure annexe 10 : Schéma de l'intégration des éléments dans la mallette.*

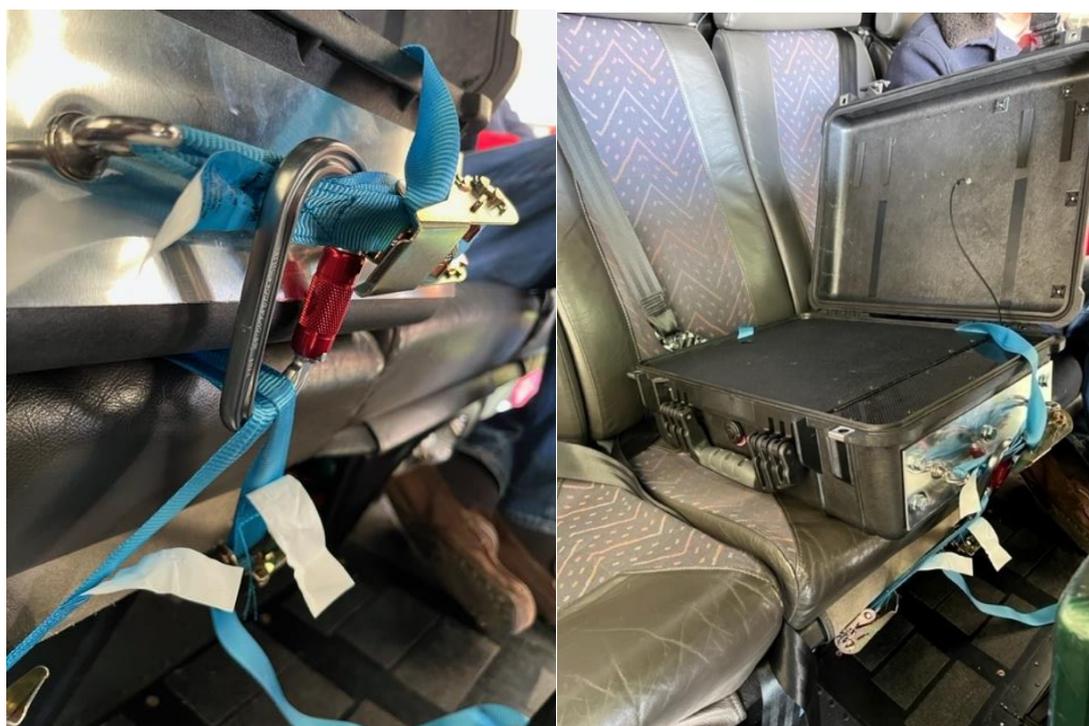
Des trous ont été percés dans la plaque de la mallette afin de permettre une bonne ventilation du PC. La plaque sera maintenue fermée en vol avec des vis freinées (avec frein filet). Deux plaques aluminium avec des anneaux ont été fixées pour renforcer les côtés de la mallette sur lesquelles les mousquetons venaient se fixer le tout avec des vis freinées par du frein filet.

### Maquettage de la fixation de la mallette à bord de l'hélicoptère.

La mallette a été sanglée sur un siège entre le CE et l'opérateur (voir Figure annexe 11).



*Figure annexe 11 : Emplacement de la mallette à bord du Fenec.*



*Figure annexe 12 : Photos du sanglage de la mallette pour le maquettage sécurité mallette.*

Les sangles entourant la banquette passaient par des anneaux au sol (voir Figure 11). Il fallait être vigilant au cheminement des sangles sous le siège afin de ne pas endommager de matériel.

**TABLE DES FIGURES**

Figure 1 : Représentation graphique du fonctionnement du traitement d'une information par un être humain selon le modèle de Baddeley et Hitch (1974). ..... 10

Figure 2: Représentation schématique de la boucle sensorimotrice..... 19

Figure 3 : (A) Schéma de la tâche expérimentale en référentiel géocentré et (B) en référentiel égocentré avec les annotations 'L'pour left et 'R' pour right sur les cibles représentées par les rectangles verts respectivement à gauche et droite. (C) montre le contrôleur avec des flèches bleues pour la direction du mouvement..... 34

Figure 4 : Schéma du design de la tâche de Fitts pour le référentiel géocentré (A) et pour le référentiel égocentré (B). ..... 35

Figure 5 : Explications du setup expérimental des 4 expérimentations. .... 36

Figure 6 : Photographie du setup de l'expérience..... 38

Figure 7 : Mini-manche Brunner utilisé comme contrôleur dans l'expérimentation ainsi que ses dimensions. .... 39

Figure 8 : (A) Photographies du placement des électrodes EMG et des marqueurs de motion capture, (B) Photographie du positionnement du bras du participant lors de l'expérience. .... 41

Figure 9 : Figure représentant l'évolution du plan de phase avec le basculement d'un oscillateur harmonique (cercle) vers un oscillateur non-linéaire (ellipse), normalisée entre 1 et -1 d'après la méthode de Mottet et Bootsma 1999. .... 44

Figure 10 : Schéma représentant le découpage d'un cycle d'un pointage réciproque avec les mesures cinématiques de temps de mouvement, position du pic de vitesse, durée de la phase d'accélération et de décélération..... 45

Figure 11 : Schéma du calcul du DIMSS-PM..... 46

Figure 12 : Schéma du calcul de la différence des intégrales : Diff\_integrale AVAP..... 48

Figure 13 : Image du modèle de notre étude musculosquelettique adapté du modèle Arm26 dans OpenSim. .... 50

Figure 14 : (A) Représente le visuel de l'expérience en condition géocentrée et (B) le visuel de l'expérience en condition égocentrée. .... 54

Figure 15 : Graphiques des résultats des scores du NASA-TLX en fonction de l'ID pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .... 56

Figure 16 : Graphiques du DIMSS-PM en fonction de l'ID avec les résultats post hocs associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .... 58

Figure 17 : Graphiques du Temps de mouvement (TM) en fonction de la difficulté de la tâche avec les effets associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B)..... 59

Figure 18 : Graphiques du nombre de portes validées en fonction de l'ID avec les résultats post-hoc associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .... 60

Figure 19: Graphiques du positionnement du pic de vitesse en fonction de la difficulté de la tâche avec les effets associés pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .... 61

Figure 20 : Graphiques du (A) Portrait de phase (vitesse en fonction de la position) normalisé entre 1 et -1 en condition géocentrée et (B) en condition égocentrée. Avec en jaune le mouvement de supination et en bleu le mouvement de pronation..... 62

Figure 21 : Graphiques des (A) Régressions entre le TM et les sores du NASA-TLX pour le référentiel géocentré (B) Régressions entre le TM et les scores du NASA-TLX pour le référentiel égocentré..... 63

Figure 22 : Graphiques des (A) Régression entre la position du pic de vitesse et les scores du NASA-TLX pour le référentiel géocentré, (B) Régression entre la position du pic de vitesse et les scores du NASA-TLX pour le référentiel égocentré..... 64

Figure 23 : (A) Graphique de la régression entre le DIMSS-PM et le temps de mouvement TM en référentiel géocentré et (B) en référentiel égocentré. (C) Graphique de la régression entre le DIMSS-PM et la position du pic de vitesse en référentiel géocentré et (D) en référentiel égocentré. .... 66

Figure 24 : (A) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score global du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite, (B) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score mental du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite, (C) Régression entre la valeur du DIMSS-PM et le score physique du NASA-TLX pour le référentiel géocentré à gauche et égocentré à droite. .... 67

Figure 25 : Graphique représentant la moyenne d'activation, le maximum de l'activation et l'intégrale de l'activation pour chaque muscle en condition géocentrée (A) et en condition égocentrée (B)..... 68

Figure 26 : Graphique représentant le coefficient de co-activation de Kellis moyen en fonction de l'ID, avec en rouge le coefficient calculé sur l'ensemble du demi-cycle, en vert le coefficient est calculé avant le pic de vitesse et en bleu après le pic de vitesse pour chaque ID en géocentré (A) et égocentré (B). .... 70

## TABLE DES FIGURES

Figure 27 : Graphique représentant le coefficient de co-activation de Ervilha moyen en fonction de l'ID, avec en rouge le coefficient calculé sur l'ensemble du demi-cycle, en vert le coefficient est calculé avant le pic de vitesse et en bleu après le pic de vitesse pour chaque ID en géocentré (A) et égocentré (B). .....	71
Figure 28 : Graphique représentant en rouge la différence des intégrales de la différence agoniste/antagoniste avant – après le pic de vitesse, en vert l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste avant le pic de vitesse et en bleu l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B). .....	72
Figure 29 : Graphique représentant en rouge le pourcentage de co-activation de Kellis sur tout le mouvement, en vert le pourcentage de co-activation de Kellis avant le pic de vitesse et en bleu le pourcentage de co-activation de Kellis après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B). .....	73
Figure 30 : Graphique représentant en rouge le pourcentage de co-activation de Ervilha sur tout le mouvement, en vert le pourcentage de co-activation de Ervilha avant le pic de vitesse et en bleu le pourcentage de co-activation de Ervilha après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B). .....	74
Figure 31 : Graphique représentant en rouge la différence des intégrales de la différence agoniste/antagoniste avant – après le pic de vitesse, en vert l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste avant le pic de vitesse et en bleu l'intégrale de la différence agoniste/antagoniste après le pic de vitesse en fonction de l'ID en géocentré (A) et égocentré (B). .....	75
Figure 32 : Représente le visuel des participants en référentiel géocentré (A) et en référentiel égocentré (B). .....	85
Figure 33 : Graphiques des différents scores du NASA-TLX pour les pilotes et les civils en mode de contrôle en position en référentiel géocentré noté PGEO (A) et en référentiel égocentré noté PEGO(B). .....	87
Figure 34 : Graphique des valeurs du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la tâche dans le référentiel géocentré et le référentiel égocentré pour les civils et les pilotes. ....	90
Figure 35 : Graphique du nombre de portes validées en fonction de la difficulté de la tâche dans les deux référentiels pour les civils et les pilotes. ....	91
Figure 36 : Graphique du TM en fonction de la difficulté de la tâche dans les deux référentiels pour les civils et les pilotes. ....	92
Figure 37 : Graphique du PV en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré et égocentré. ....	94
Figure 38 : Graphique des portraits de phase pour les civils et les pilotes pour le référentiel géocentré (noté PGEO) et égocentré (noté PEGO). .....	95
Figure 39 : Schéma représentant le visuel de la simulation des participants en référentiel égocentré (A) et géocentré (B). .....	109
Figure 40 : Graphiques des différents scores du NASA-TLX en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .....	111
Figure 41 : Graphiques du nombre de portes validées en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .....	113
Figure 42 : Graphiques (A) du TMt à gauche et du TMe à droite en fonction de la difficulté de la tâche et pour (le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .....	114
Figure 43 : Graphiques du PVt à gauche et du PVe à droite en fonction de la difficulté de la tâche pour le référentiel géocentré (A) et égocentré (B). .....	115
Figure 44 : Schéma du déroulement du protocole des essais en vol. ....	124
Figure 45 : Photographies du pilote équipé de l'ensemble des dispositifs utilisés pour l'acquisition du mouvement. ....	128
Figure 46 : Schéma du découpage des demi-cycle de la manœuvre de Side-Step. ....	132
Figure 47 : Graphiques de scores moyen du NASA-TLX de la manœuvre de Side-step et en noir les valeurs de l'écart relatif entre les deux difficultés pour les deux pilotes. ....	133
Figure 48 : (A) Graphique des valeurs moyennes du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du DIMSS-PM en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement. ....	134
Figure 49 : (A) Graphique des valeurs moyennes du TMt en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du TMt en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement. (C) Graphique des valeurs moyennes du TMe en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement et (D) Graphique des valeurs du TMe en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement. ....	136
Figure 50 : (A) Graphique des valeurs moyennes du PVt en fonction de la difficulté de la manœuvre, (B) Graphique des valeurs du PVt en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote	

## LISTE DES TABLEAUX

individuellement. (C) Graphique des valeurs moyennes du PVE en fonction de la difficulté de la manœuvre, (D) Graphique des valeurs du PVE en fonction de la difficulté de la manœuvre pour chaque pilote individuellement.....	137
Figure 51 : (A) Portraits de phase pour la condition GVE (noté ID=0) et pour la condition DVE (noté ID=1) et (B) les portraits de Hooke pour la condition GVE (noté ID=0) et pour la condition DVE (noté ID=1). Ces graphiques sont réalisés à partir du TMT uniquement. ....	138

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau des différents problèmes rencontrés dans le système sensorimoteur .....	20
Tableau 2 : Tableau récapitulatif des fonctions de coûts existants en fonction de leur nature.....	23
Tableau 3 : Répartition des participants par catégories. ....	35
Tableau 4 : Paramétrage des expériences pour les deux référentiels.....	36
Tableau 5 : Présentation des variables indépendantes et dépendantes suivis de leur espace de traitement. ....	40
Tableau 6 : Tableau des variables dépendantes mesurées en cinématique. ....	43
Tableau 7 : Tableau des variables dépendantes mesurées dans les expériences 1 et 2 et de leur espace de traitement .....	54
Tableau 8 : Tableau représentant les résultats statistiques de l'effet de l'ID sur l'activité musculaire moyenne ou maximale de chaque muscle.....	69
Tableau 9 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps et les scores du NASA-TLX pour les deux référentiels.....	77
Tableau 10 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple rond-pronateur/brachioradial et les scores du NASA-TLX » pour les deux référentiels.....	78
Tableau 11 : Tableau des variables dépendantes de les expériences n° 1 et 2 suivis d'un tableau des variables dépendantes par espace d'analyse.....	85
Tableau 12 : Tableau des résultats des test statistiques pour le DIMSSPM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	90
Tableau 13 : Tableau des résultats des test statistiques pour le nombre de portes validées pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	91
Tableau 14 : Tableau des résultats des test statistiques pour le TM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	93
Tableau 15 : Tableau des résultats des test statistiques pour le PV pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	94
Tableau 16 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le TM et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	96
Tableau 17 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le PV et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	96
Tableau 18 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le TM et le DIMSS-PM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	97
Tableau 19 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le PV et le DIMSS-PM pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	97
Tableau 20 : Tableau des résultats des test statistiques pour de la relation entre le DIMSS-PM et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	98
Tableau 21 : Tableau des résultats des test statistiques pour des différentes métriques de co-activation du couple biceps/triceps pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	99
Tableau 22 : Tableau des résultats des test statistiques pour des différentes métriques de co-activation du couple brachio/rond-pronateur pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels.....	101
Tableau 23 : Tableau des résultats des test statistiques pour des relations entre les différentes métriques de co-activation du couple biceps/triceps et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	103
Tableau 24 : Tableau des résultats des test statistiques pour des relations entre les différentes métriques de co-activation du couple brachio/rond-pronateur et les différents scores du NASA-TLX pour les civils et les pilotes dans les deux référentiels. ....	104
Tableau 25 : Tableau représentant les variables dépendantes pour les expériences 3 et 4 suivis d'un tableau des variables dépendantes dans leur espace de traitement. ....	109

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 26 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le score « mental » du NASA-TLX pour les deux référentiels. ....	112
Tableau 27 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le nombre de portes validées pour les deux référentiels. ....	113
Tableau 28 : Tableau des résultats statistiques de l'effet de l'augmentation de l'ID sur le TMt et le TMe pour les deux référentiels. ....	114
Tableau 29 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre le score « mental » et le TMt puis le TMe pour les deux référentiels. ....	116
Tableau 30 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre le score « mental » et le PVt puis le PVe pour les deux référentiels. ....	117
Tableau 31 : Tableau des résultats des test statistiques de l'effet de l'ID sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps pour les deux référentiels. ....	118
Tableau 32 : Tableau des résultats des test statistiques de l'effet de l'ID sur les différentes mesures de co-activation pour le couple brachio/rond-pronateur pour les deux référentiels. ....	119
Tableau 33 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple biceps/triceps et le score « mental » pour les deux référentiels. ....	120
Tableau 34 : Tableau des résultats des test statistiques pour la relation entre sur les différentes mesures de co-activation pour le couple brachio/rond-pronateur et le score « mental » pour les deux référentiels...	121
Tableau 35 : Tableau contenant la manœuvre de Side Steps, les difficultés et le nombre de répétitions effectué. ....	126
Tableau 36 : Tableau représentant les variables dépendantes pour les essais en vol suivis d'un tableau des variables dépendantes des essais en vol. ....	130
Tableau 37 : Tableau des résultats des différents scores du NASA-TLX pour chaque difficulté par pilote et les scores moyens. ....	133
Tableau 38 : Tableau des valeurs du DIMSS-PM pour chaque pilote puis la moyenne des deux. ....	134
Tableau 39 : Tableau des valeurs du Cooper-Happer pour chaque pilote lors des 3 évaluations. ....	135
Tableau 40 : Tableau des valeurs du TMt et du TMe pour chaque pilote puis la moyenne pour les deux.	136
Tableau 41 : Tableau des valeurs du PVt et du PVe pour chaque pilote puis la moyenne pour les deux. ....	137