



**HAL**  
open science

# Modèle interne de la friction pour la paramétrisation d'un mouvement balistique de frappe pour faire glisser un objet jusqu'à une cible

Sylvain Famié

## ► To cite this version:

Sylvain Famié. Modèle interne de la friction pour la paramétrisation d'un mouvement balistique de frappe pour faire glisser un objet jusqu'à une cible. Psychologie et comportements. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPASW005 . tel-03948531

**HAL Id: tel-03948531**

**<https://theses.hal.science/tel-03948531>**

Submitted on 20 Jan 2023

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

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

# Modèle interne de la friction pour la paramétrisation d'un mouvement balistique de frappe pour faire glisser un objet jusqu'à une cible

*Internal model of friction for the parameterization of a ballistic strike movement to slide an object toward a target*

## Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n°566 : Sciences du sport, de la motricité et du mouvement humain (SSMMH)  
Spécialité de doctorat : Sciences du mouvement humain  
Graduate School : Sport, mouvement et facteurs humains  
Référent : Faculté des Sciences du Sport

Thèse préparée dans l'unité de recherche **CIAMS**, Université Paris-Saclay,  
sous la direction de **Michel-Ange Amorim**, Professeur des Universités,  
la co-direction de **Mehdi Ammi**, Professeur des Universités

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 07 octobre 2022, par

**Sylvain Famié**

## Composition du Jury

|   |                           |
|---|---------------------------|
| <b>Sylvie Vernazza-Martin</b><br>PU, Université Paris Nanterre        | Examinatrice & Présidente |
| <b>Robin Baurès</b><br>MCF-HDR, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier | Rapporteur                |
| <b>Frédéric Danion</b><br>CR CNRS, Université de Poitiers             | Rapporteur                |
| <b>Laurence Mouchnino</b><br>MCF-HDR, Université Aix-Marseille        | Examinatrice              |
| <b>Michel-Ange Amorim</b><br>PU, Université Paris-Saclay              | Directeur                 |
| <b>Mehdi Ammi</b><br>PU, Université Paris 8                           | Co-Directeur              |

**Titre :** Modèle interne de la friction pour la paramétrisation d'un mouvement balistique de frappe pour faire glisser un objet jusqu'à une cible

**Mots clés :** Modèle interne de la friction, Mouvement balistique de frappe, Contrôle moteur, Biomécanique

**Résumé :** La friction est une force avec laquelle nous devons composer dans la vie de tous les jours, lorsque nous manipulons des objets ou que nous les faisons glisser. Dans la présente thèse, les participants ont effectué un mouvement de frappe (avec l'index) pour faire glisser un objet plastique de forme cubique dans une gouttière jusqu'à une distance cible. Selon les conditions, les facteurs expérimentaux manipulés sont : le matériau de la surface sur laquelle l'objet glisse, l'inclinaison de la surface (-10°, 0°, ou +10°) et la distance cible, pour un nombre d'essais donné.

L'analyse de l'erreur spatiale (entre l'objet et la cible) ainsi que la vitesse initiale de l'objet après impact avec le doigt suggèrent qu'au fil des essais, le mouvement est paramétré pour réduire l'erreur spatiale afin de calibrer un modèle interne du coefficient de friction ( $\mu$  subjectif) pour une surface donnée. Par la suite, ce  $\mu$  subjectif peut être généralisé lors d'un changement de condition d'inclinaison et/ou de distance, ou bien faire l'objet d'une recalibration. L'analyse biomécanique montre que dans les conditions les plus simples, les participants adoptent la

rotation d'un seul segment (la main) afin de fournir l'énergie cinétique nécessaire pour atteindre la cible. Ce n'est qu'avec l'augmentation des contraintes de la tâche que certains participants décident d'adopter une nouvelle stratégie motrice en ajoutant un degré de liberté (rotation de l'avant-bras), avec un plus grand succès dans les conditions les plus difficiles. Nos résultats montrent également que certains participants préfèrent garder un paramètre spatiotemporel invariant (amplitude ou durée de la frappe) et faire varier l'autre pour contrôler la vitesse à l'impact; tandis que d'autres participants font varier les deux paramètres privilégiant le contrôle de l'accélération avant l'impact.

En conclusion, nous apportons la preuve, qu'au travers de la répétition des essais, le cerveau se construit un modèle interne de la friction qui permet de paramétrer le mouvement balistique de frappe afin de réguler la quantité d'énergie cinétique nécessaire à l'impact, pour transmettre à l'objet la vitesse initiale appropriée afin qu'il glisse jusqu'à une distance cible.

**Title :** Internal model of friction for the parameterization of a ballistic strike movement to slide an object toward a target

**Keywords :** Internal friction model, Ballistic striking movement, Motor control, Biomechanics

**Abstract :** Friction is a force we have to deal with in everyday life when we handle objects or slide them. In this thesis, participants performed a striking motion (with the index finger) to slide a cubic shaped plastic object through a gutter toward a target distance. Depending on the conditions, the experimental factors manipulated are the material of the surface on which the object slides, the inclination of the surface (-10°, 0°, or +10°) and the target distance, for a given number of trials.

The analysis of the spatial error (between the object and the target) as well as the initial speed of the object after impact with the finger suggests that, over the trials, the movement is parameterized to reduce the spatial error in order to calibrate an internal model of the coefficient of friction ( $\mu$  subjective) for a given surface. Subsequently, this  $\mu$  subjective can be generalized when the condition of inclination and/or distance is changed, or can be recalibrated. The biomechanical analysis shows that, in the simplest conditions, participants adopt the same motor

strategy by recruiting rotation of only one segment (the hand) to provide the kinetic energy needed to reach the target. It is only with increasing task constraints that some participants decide to adopt a new motor strategy by adding a degree of freedom (forearm rotation), with greater success in the most difficult conditions. Our results also show that some participants prefer to keep one spatiotemporal parameter invariant (amplitude or duration of the strike) and to vary the other for controlling the speed at impact; while other participants vary both parameters favoring the control of acceleration before impact.

In conclusion, we provide evidence that, through the repetition of trials, the brain builds an internal model of friction that allows it to parameterize the ballistic striking movement in order to regulate the amount of kinetic energy required at impact, for transmitting to the object the appropriate initial velocity so that it slides to a target distance.

# Remerciements

Réaliser une thèse est pour moi l'aboutissement d'un rêve d'enfant. Ma curiosité et mon goût de la recherche m'ont toujours guidé, je suis fier d'avoir pu mener à bien ce projet grâce à toutes les personnes qui m'ont accompagné ces dernières années.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon directeur Michel-Ange Amorim sans lequel ce sujet de thèse n'aurait pu être possible. Je suis très heureux d'avoir pu poursuivre les travaux qu'il avait initiés sur le modèle interne de la friction. Je le remercie pour sa patience, sa confiance, sa disponibilité et son écoute. Grâce à ses connaissances, sa rigueur scientifique et sa pédagogie, notre travail de collaboration a porté ses fruits avec une publication dans la revue Plos One. Je veux lui témoigner toute ma reconnaissance pour son soutien et ses conseils avisés.

Je souhaite transmettre mes remerciements à mon co-directeur Mehdi Ammi pour son aide et son écoute. Notre collaboration a commencé avec un stage dès la première année de master. Un grand merci pour m'avoir accueilli au LIMSI dans son équipe conviviale d'ingénieurs de recherches et de doctorants. Je tiens à lui témoigner ma gratitude pour m'avoir permis de poursuivre en ATER à l'université Paris 8.

Je tiens à remercier Vincent Bourdin pour sa patience et sa disponibilité malgré son emploi du temps chargé. Ses qualités pédagogiques et humaines m'ont beaucoup apporté lors de nos échanges. C'est grâce à son aide que j'ai pu aller aussi loin dans la compréhension du contrôle de l'énergie cinétique et de la physique de la friction. Merci pour le temps que tu as consacré à me transmettre ta passion pour la physique. Ta présence en tant que membre du jury invité me touche particulièrement.

Je suis reconnaissant aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail : Robin Baurès et Frédéric Danion qui ont bien voulu se charger de la tâche de rapporteur, ainsi qu'à Sylvie Vernazza-Martin et à Laurence Mouchnino d'avoir bien voulu examiner cette thèse.

Je tiens également à remercier les membres de mes comités de suivi, Bastien Berret et Patrice Senot, pour leurs conseils qui m'ont permis de prendre du recul et de faire évoluer ma réflexion.

Mon parcours universitaire est pluridisciplinaire : licence en biologie santé, master STAPS ingénierie et sciences du mouvement humain. Cela m'a permis de travailler dans plusieurs laboratoires avec des thématiques de recherches très différentes. A mes débuts, un stage sur la

mise en place d'un système de tracking du mouvement des antennes des abeilles m'a orienté vers l'analyse informatique du mouvement.

➤ Le CIAMS m'a accueilli pour mon master et m'a permis de poursuivre en doctorat.

L'ambiance conviviale du laboratoire a été pour moi une source d'épanouissement. L'écoute d'Ombeline et d'Elodie m'a été très précieuse au fil de ces années. La course à pied avec Florian et les discussions avec Ariane ont été une source de motivation. Pour toutes ces années partagées avec notre grande famille de doctorants: Simon, Guillaume, Jean-Philippe, Elodie G., Adrien, Dorian, Thomas, Fanny, Clément, Karina, Tiffanie, Nadège, Anne S, Anne T, Alex, Antoine, Baptiste, Julien, Isabelle, Lucas, Waldez, Wahbi, Susan, Maméo et tous les autres. Merci à tous pour les bons moments passés ensemble.

Je suis très heureux d'avoir pu collaborer avec les membres du service administratif et enseignant. Je remercie Bastien et Nicolas V pour leurs conseils sur l'analyse du mouvement ainsi que Nicolas M pour le dépannage informatique.

Je souhaite à toute l'équipe du laboratoire de continuer à faire briller les couleurs du CIAMS.

➤ Le LIMSI devenu LISN a été pour moi un lieu d'ouverture et de découvertes.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe AMI de m'avoir accueilli. Un grand merci à Maxence et Adrien pour leur amitié et leur soutien. Au sein de l'équipe d'ingénieurs de recherches et de doctorants, je suis heureux d'avoir rencontré des personnes formidables : Jean-Baptiste, Iñaki, Julien, Thomas, Youcef, Hussein et tous les autres. Les astuces avisées en électronique de Franck et les conseils de Michèle vont me manquer.

Que serait le dernier étage du laboratoire sans les camarades de l'équipe CPU. Je veux remercier Delphine, David et Amine pour leur écoute et leur sens du partage. Pour leur disponibilité et leur assistance, je tiens à adresser mes remerciements à Elise et Nicolas S qui m'ont permis d'évoluer.

A mes autres collègues du laboratoire, je veux adresser mes remerciements à Nicolas L (pour son aide et nos discussions sur la réalité virtuelle), à Laurent (pour son partage sur l'informatique) et à Dorine (pour son assistance en conception 3D). J'adresse aussi mes meilleurs sentiments à tous les collègues du laboratoire que je retrouvais autour de la pause-café.

➤ A l'université de Nanterre, je tiens tout particulièrement à remercier Vincent D et Giovanni pour m'avoir accueilli dans leur équipe enseignante. Merci aux collègues du bureau 309,

notamment Maher et Nada, pour leur bienveillance et leur écoute. Je pense aux camarades du bureau 403 pour leur bonne humeur communicative, Lola, Ben, Nedjma, Hamsa et tous les autres.

Mes remerciements vont à mes amis qui m'ont permis de sortir la tête de la recherche de temps en temps grâce à nos programmes sportifs du week-end et à nos vacances partagées.

Ma famille a été pour moi un soutien indéfectible, elle m'a encouragé à suivre ma passion pour les sciences et m'a permis d'aller jusqu'au bout de cette thèse. Je remercie tout particulièrement mon père Jacques pour les relectures. Sa patience, son calme, son esprit critique m'ont été d'une grande aide. Ma mère Isabelle m'a transmis sa curiosité. Sa bienveillance et sa détermination m'ont aidé à avancer. Je remercie mon frère Clément pour sa joie de vivre et son sens de l'accueil et Oma, ma grand-mère, dont l'attitude toujours positive est une source d'inspiration.

# **Glossaire**

$\mu$  : coefficient de frottement

$\mu_s$  : coefficient de frottement statique

$\mu_c$  : coefficient de frottement cinétique

$\mu_{subjectif}$  : coefficient de frottement subjectif

EC = KE : Énergie cinétique

PM : Programme moteur (Schmidt, 1975)

PMG : Programme moteur généralisé (Schmidt, 1975)

Méthode MSI : multiples sources d'information (Schot et al., 2010)

TM : Temps par mouvement

Pour les analyses statistiques, les décimales seront indiquées par un point au lieu d'une virgule (systèmes anglo-saxon).

# Sommaire

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....   | 1  |
| 2. Cadre théorique .....   | 5  |
| 2.1 Contrôle moteur d'un geste balistique .....  | 5  |
| 2.1.1 Un geste balistique de frappe .....  | 5  |
| 2.1.2 La coordination motrice du geste de frappe .....   | 10 |
| 2.1.3 Améliorer la performance motrice : adaptation versus apprentissage .....                         | 14 |
| 2.2 Paramétrisation du mouvement .....   | 17 |
| 2.2.1 Du schéma moteur à la performance .....  | 17 |
| 2.2.2 Modèle interne pour le contrôle moteur .....   | 20 |
| 2.3 Modèles internes de la physique .....  | 24 |
| 2.3.1 Physique d'un objet glissant jusqu'à une cible.....  | 24 |
| 2.3.2 Modèle interne de la gravité.....  | 27 |
| 2.3.3 Une perception multisensorielle de la friction .....   | 30 |
| 2.3.3.1 Distinguer haptiquement rugosité et friction .....   | 30 |
| 2.3.3.2 La préhension .....  | 31 |
| 2.3.3.3 La marche .....  | 34 |
| 2.3.4 De la physique naïve à la physique implicite : perception et modèle interne de la friction ..... | 36 |
| 2.3.4.1 Paradigmes de physique naïve .....   | 36 |
| 2.3.4.2 Paradigmes de physique implicite .....   | 37 |
| 3. Problématique .....   | 42 |
| 4. Contribution expérimentale.....   | 44 |
| 4.1 Expérience 1 : Perception de la friction .....   | 44 |
| 4.1.1 Problématiques et hypothèses .....   | 44 |
| 4.1.2 Matériel et méthode .....  | 45 |
| 4.1.2.1 Participants.....  | 45 |
| 4.1.2.2 Configuration expérimentale .....  | 45 |
| 4.1.2.3 Caractérisation du coefficient de frottement.....  | 46 |
| 4.1.2.4 Acquisition des données.....   | 48 |
| 4.1.2.5 Tâche expérimentale .....  | 48 |
| 4.1.3 Résultats .....  | 49 |
| 4.1.4 Discussion.....  | 56 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>4.2 Expérience 2 : Analyse du mouvement pour faire glisser un objet</b> .....                     | 57  |
| 4.2.1 Problématiques et hypothèses .....   | 57  |
| 4.2.2 Matériel et méthode .....  | 58  |
| 4.2.2.1 Participants .....   | 58  |
| 4.2.2.2 Configuration expérimentale .....  | 59  |
| 4.2.2.3 Acquisition des données .....  | 60  |
| 4.2.2.4 Tâche expérimentale .....  | 60  |
| 4.2.2.5 Analyse des données .....  | 62  |
| 4.2.3 Résultats .....  | 67  |
| 4.2.3.1 Performance moyenne .....  | 67  |
| 4.2.3.2 Performance et adaptation motrice en fonction de la transition de blocs .....                | 72  |
| 4.2.3.3 Coordination motrice .....   | 78  |
| 4.2.3.4 Contrôle de l'énergie cinétique .....  | 83  |
| 4.2.3.5 Evolution du contrôle de l'énergie cinétique en fonction des conditions expérimentales ..... | 86  |
| 4.2.3.6 Régulation de la phalange de l'index durant les conditions .....                             | 90  |
| 4.2.3.7 Stratégies spatio-temporelles du contrôle de la frappe .....                                 | 93  |
| 4.2.4. Discussion .....  | 104 |
| 4.2.4.1 Modèle interne de la friction ( $\mu$ <i>subjectif</i> ) .....                               | 104 |
| 4.2.4.2 Coordination motrice .....   | 106 |
| 4.2.4.3 Régulation de l'énergie cinétique .....  | 107 |
| 4.2.4.4 Régulation des paramètres cinématiques à l'impact .....                                      | 108 |
| 4.2.4.5 Stratégies spatio-temporelles du contrôle de la frappe .....                                 | 109 |
| <b>5. Discussion générale</b> .....  | 111 |
| 5.1 Modèle interne de la friction .....  | 111 |
| 5.2 Variabilité motrice dans la paramétrisation du mouvement en fonction de la friction .....        | 115 |
| 5.3 Perspectives .....   | 119 |
| <b>6. Références bibliographiques</b> .....  | 123 |
| <b>7. Annexes</b> .....  | 132 |

# 1. Introduction

Dans la vie de tous les jours, notre corps interagit avec des surfaces et notre cerveau doit prendre en compte les propriétés des matériaux présents dans l'environnement pour programmer des actions motrices adaptées. C'est notamment le cas lorsque nous devons soulever un verre ou écrire avec un stylo et serrer suffisamment l'objet afin qu'il ne glisse pas entre les doigts. Il en va de même lorsque nous marchons, nous devons appliquer sur le sol suffisamment de force pour nous permettre de nous propulser vers l'avant tout en ne dépassant pas la limite de la force de frottement statique<sup>1</sup> afin de ne pas glisser. En effet, notre cerveau semble donc prendre en considération la force de frottement statique lorsque nous interagissons directement avec des objets; mais qu'en est-il lorsque nous devons faire glisser un objet jusqu'à une distance cible ? Lorsqu'un objet glisse sur une surface pour arriver jusqu'à une cible, c'est le coefficient de frottement cinétique qui entre en compte ; ce dernier est très légèrement inférieur au coefficient de frottement statique. Nous avons en tête l'image du barman qui fait glisser un verre sur le comptoir jusqu'à un client ou du joueur de curling qui prend en compte la friction avec la glace pour que la pierre glisse jusqu'au centre de la cible. Nous défendons la thèse que, pour ce type de tâche, l'être humain ait besoin dans un premier temps d'interagir physiquement avec les objets et les surfaces en contact pour se construire une représentation de la friction grâce au retour sensoriel dû au toucher et à la vision afin de pouvoir extrapoler la vitesse à fournir à l'objet pour qu'il puisse glisser avec précision jusqu'à une distance cible, sur la base d'un modèle interne de la physique. A partir de nos expériences antérieures et des retours sensoriels, notre cerveau calibrerait un coefficient de frottement subjectif ( $\mu$  *subjectif*) de l'interaction entre deux surfaces afin de programmer la commande motrice adéquate pour donner à l'objet l'énergie cinétique permettant d'atteindre une distance cible.

Ainsi, ce travail de thèse porte sur le rôle d'un modèle interne de la friction ( $\mu$  *subjectif*) dans la paramétrisation d'un mouvement balistique de frappe afin de faire glisser un objet jusqu'à une distance cible. Pour répondre à cette question de recherche, nous avons construit un dispositif expérimental spécifique. Un parallélépipède rectangle fabriqué par impression 3D

---

<sup>1</sup> La force de frottement statique  $\vec{F}_s$  entre deux solides a été définie par Coulomb comme étant le coefficient de frottement statique  $\mu_s$  multiplié par la réaction normale du support  $\vec{R}_n$  (cette force étant proportionnelle à l'intensité du poids) :  $\|\vec{F}_s\| = \mu_s \cdot \|\vec{R}_n\|$

est placé à l'extrémité d'une gouttière dont la surface est interchangeable au niveau de la base. Les paramètres manipulés sont : le matériau de surface, l'inclinaison et la distance des cibles à atteindre. Lors des expériences, les participants avaient pour instruction de frapper l'objet avec leur index de façon à le faire glisser jusqu'à une distance cible. Les participants pouvaient frapper l'objet avec la coordination motrice qu'ils souhaitaient à partir du moment où l'avant-bras restait dans le plan de la table.

Dans notre tâche expérimentale, le mouvement de frappe peut être défini comme un geste balistique. Un geste balistique est un mouvement rapide de courte durée effectué de manière séquentielle, préprogrammé par notre cerveau, avec une phase d'armer suivie d'une phase de frappe avec une forte accélération dite balistique en direction d'une cible puis, à la fin, d'une phase de décélération une fois le mouvement de frappe effectué. Lorsqu'un geste de frappe est réalisé, il y a une certaine variabilité motrice entre chaque mouvement due au bruit sensorimoteur et à certaines sources de redondances (Sternad, 2018). La redondance intrinsèque correspond aux différentes coordinations articulaires qui peuvent être adoptées par le participant pour réaliser la tâche. La redondance extrinsèque est définie par les différentes trajectoires d'approches possibles pour frapper avec l'index, notamment juste avant l'impact. Enfin, il y a la redondance due à la tâche, telle que l'orientation de la phalange et la position de l'index sur la face de l'objet lors de l'impact. Il est important de distinguer la variabilité intra-sujet qui représente l'évolution des coordinations motrices au cours des essais et la variabilité inter-sujets qui reflète le niveau d'expertise motrice (issu de l'apprentissage moteur), mais également les préférences individuelles de coordination motrice (privilégier la rotation du poignet ou de l'avant-bras). Dans la thèse, nous avons étudié l'adaptation motrice au cours des essais en termes d'erreur spatiale, entre l'objet et la cible, qui dépend de la vitesse transmise à l'objet après impact en fonction des différentes conditions expérimentales.

Pour pouvoir contrôler la frappe de l'objet afin qu'il atteigne sa cible, le cerveau doit être capable de paramétrer son geste. Pour ce faire, il utilise un programme moteur qui est modulé en fonction des contraintes de la tâche en ajustant les paramètres de temps de mouvement, d'amplitude et la sélection des éléments musculo-squelettiques nécessaires pour réaliser le mouvement (Schmidt & Debû, 1993). Cette paramétrisation nécessite d'anticiper les conséquences sensorielles du geste (le déplacement de l'objet sur la surface), de tenir compte du bruit dans la transmission de l'information, ainsi que de connaissances antérieures sur la tâche et son contexte. Cette anticipation est possible grâce, d'une part, à un modèle interne qui

lui permet de simuler les propriétés de l'environnement et les propriétés dynamiques de l'objet (McNamee & Wolpert, 2019), et, d'autre part, à un modèle interne du corps pour choisir la commande motrice adaptée en fonction de la coordination motrice choisie. Ensuite, il compare la commande motrice avec les retours sensoriels de façon à corriger le geste.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons particulièrement à cette faculté qu'a le cerveau de pouvoir anticiper les propriétés de l'environnement. Il est bien établi que la gravité est prise en compte à la fois pour nous orienter dans l'espace et pour contrôler nos gestes, par exemple pour attraper un objet en chute libre (Gaveau et al., 2016; Jörges & López-Moliner, 2017). Dans notre tâche, la gravité influence la dynamique de l'objet qui glisse sur une surface en fonction de l'inclinaison de cette dernière. Le moyen le plus direct de se faire une idée de la friction d'une surface est de passer dynamiquement le doigt dessus pour en extraire les informations de friction et de rugosité grâce aux mécanorécepteurs présents dans la peau (Klatzky et al., 2013). Cette extraction d'informations cutanées combinée à nos expériences passées d'interaction avec des surfaces permettent d'ajuster nos mouvements en temps réel dans des tâches telles que la marche ou soulever un objet entre ses doigts. Les informations visuelles nous permettraient de nous créer une représentation subjective de la friction entre deux surfaces mais, pour estimer celle-ci avec plus de fiabilité, il faut coupler les perceptions visuelle et haptique. De plus, l'inclinaison d'une surface semble influencer sur notre décision à nous aventurer dessus en fonction du revêtement du sol et de nos chaussures (Joh et al., 2007). La précision du jugement perceptif de la friction ne s'améliore que lorsque les participants sont en contact direct avec la pente.

Amorim et al. (2015) ont utilisé le paradigme de la perception de la causalité de Michotte, (1963) dans lequel un objet A (lanceur) se déplace vers un objet statique B (cible) puis, lorsque le lanceur atteint l'objet cible, ce dernier se met en mouvement sous l'effet de la collision et le lanceur devient stationnaire. Les participants devaient indiquer sur un écran l'endroit où l'objet cible (glissant sur une surface symbolisée par un trait qui était soit à l'horizontale, soit incliné négativement ou positivement) aurait dû s'arrêter après être entré en collision avec le lanceur. Les auteurs ont appliqué les équations de la mécanique classique du coefficient de frottement aux réponses des participants pour en déduire la valeur du  $\mu$  *subjectif*, en supposant que les participants ont anticipé que sous l'effet de la friction l'objet cible est censé décélérer après la collision jusqu'à s'arrêter à une distance donnée. Quand l'écran est dans le plan vertical, leurs résultats suggèrent que notre modèle interne du coefficient de friction est cohérent avec la

physique pour les pentes horizontales et ascendantes, mais qu'il est surestimé pour les pentes descendantes. Dans la continuité de cette étude, on peut se demander si ces résultats pourraient être généralisés à la paramétrisation d'un geste balistique destiné à faire glisser un objet le long d'une surface donnée jusqu'à la distance de la cible.

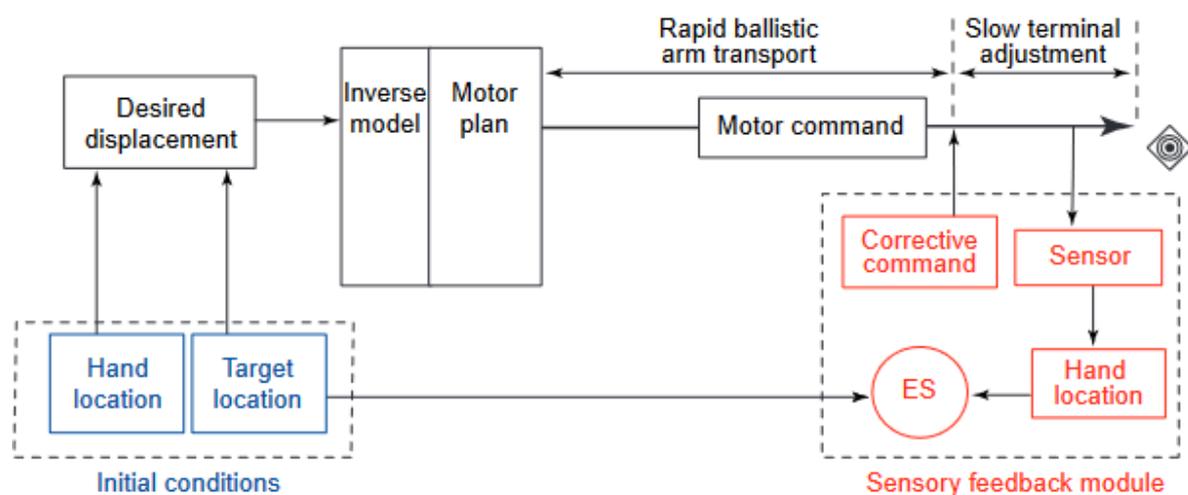
Après une revue de littérature sur les concepts nécessaires (contrôle moteur d'un geste balistique ; paramétrisation du mouvement ; modèles internes de la physique) pour comprendre le cadre théorique de la thèse, nous exposerons notre contribution expérimentale. Afin de comprendre comment le modèle interne de la friction permet la régulation du mouvement lors d'un geste balistique de frappe, nous avons réalisé deux études en utilisant comme variables de performance l'erreur spatiale entre l'objet et la cible ainsi que la vitesse initiale du cube. Nous formulons l'hypothèse que les participants doivent tout d'abord interagir avec les deux surfaces dans notre condition initiale qui était toujours à l'horizontale afin de calibrer le  $\mu$  *subjectif* (en fonction du type de surface), pour ensuite généraliser ce modèle interne de  $\mu$  aux autres conditions expérimentales (en faisant varier la distance cible et l'inclinaison de la surface) pour la même surface. Dans notre seconde expérience, nous sommes allés plus loin en analysant la paramétrisation du mouvement balistique de frappe lors des différentes conditions et en examinant la variabilité interindividuelle des coordinations motrices. Nous formulons l'hypothèse que malgré la variabilité des coordinations motrices, le cerveau contrôle l'énergie cinétique transmise au cube pour que l'objet glisse jusqu'à la cible en adaptant les redondances motrices selon une stratégie spatio-temporelle particulière.

## 2. Cadre théorique

### 2.1 Contrôle moteur d'un geste balistique

#### 2.1.1 Un geste balistique de frappe

L'être humain interagit avec son environnement au moyen de différents types de mouvements parmi lesquels on trouve les gestes balistiques qui font l'objet de la présente thèse. D'un point de vue comportemental, on peut définir un mouvement balistique comme un mouvement rapide sans correction en temps réel par retour sensoriel (visuel ou autre) (Gan & Hoffmann, 1988; Marteniuk et al., 1987). Le mouvement balistique a une courte durée d'exécution, il est initié de manière préprogrammée selon une séquence précise d'exécution en boucle ouverte. Dans une tâche de pointage manuel, contrairement à la composante initiale balistique du geste, de petits ajustements du mouvement peuvent intervenir à la fin de la trajectoire (cf. Figure 2.1.1., d'après Desmurget & Grafton, 2000). C'est pourquoi la correction de l'erreur observée une fois le mouvement exécuté est essentiellement prise en compte lors de la paramétrisation du geste à l'essai suivant.



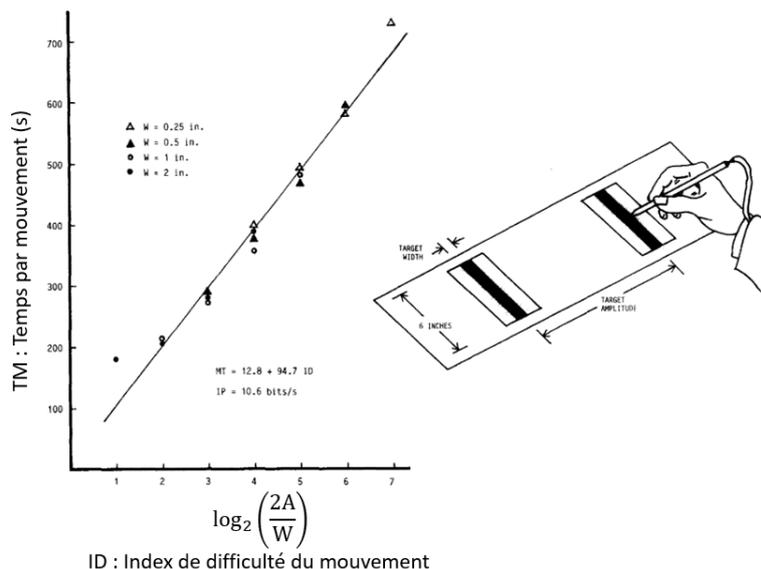
**Figure 2.1.1. Le modèle classique du contrôle du mouvement.** Le déplacement du bras est estimé en fonction de la position de la main et de la cible. Ce déplacement est ensuite converti en commande motrice (Motor plan) par un modèle inverse. La partie principale du mouvement se déroule avec un transport balistique du bras. Les boucles de rétroaction sensorielle n'interviennent qu'à la toute fin du mouvement, lorsque la vitesse est faible. La position actuelle de la main est alors comparée à la position cible. En cas de divergence, un signal d'erreur

(ES) est émis et une série de sous-mouvements correctifs est générée. Le mouvement s'arrête lorsque la main atteint la cible (cercle dans le diamant).

La littérature fournit différentes caractéristiques pour décrire le mouvement balistique de la main (Craik, 1947; J.-F. Lin & Drury, 2011; R. F. Lin & Drury, 2013) :

- Un mouvement balistique est composé d'une unité de mouvements exécutés dans un certain ordre programmé par le cerveau.
- En général, le mouvement est exécuté jusqu'à la fin sans que des perturbations puissent être prises en compte et être modifiées par le système nerveux central.
- Un mouvement balistique dans son ensemble a généralement un temps de réalisation un peu plus long qu'un temps de réaction (ce dernier étant défini comme le délai entre l'apparition d'un stimulus et le début d'une réponse motrice).

Lorsque le geste balistique consiste à pointer une cible de taille variable, les mécanismes de contrôle du geste balistique peuvent être étudiés avec les paramètres de temps de mouvement et de précision du mouvement. Traditionnellement, la loi de Fitts, (1954) rend compte de ces gestes dont la durée globale inclut une relation vitesse-précision où les paramètres de distance parcourue et de taille de la cible forment un indice de difficulté qui détermine de façon linéaire la durée totale du mouvement (Figure 2.1.2.).



**Figure 2.1.2. Illustration à droite du dispositif expérimental utilisé par Fitts et à gauche des données obtenues (adapté de Fitts, 1954; MacKenzie, 1992)**

Dans cette expérience, Fitts demandait aux participants de déplacer un stylet entre deux bandes cible noires. La consigne était de frapper le plus rapidement possible et alternativement les

deux cibles en faisant le moins d'erreurs possible ; le temps de mouvement (TM) était enregistré. Les paramètres manipulés étaient la largeur des cibles (W pour width) et l'amplitude (A) entre les cibles. Les résultats ont montré que le temps de mouvement augmente faiblement lorsque l'on fait varier l'amplitude entre les cibles. Par contre, lorsque la largeur des cibles diminue, demandant plus de précision, le temps de mouvement augmente. De façon globale, cette étude met en avant que lorsqu'on garde un rapport constant ( $2A/W$ ) entre amplitude du mouvement et largeur de la cible, le temps de mouvement demeure constant. La loi de Fitts définit que le temps de mouvement varie linéairement en fonction de l'indice de difficulté du mouvement " $\log_2(2A/W)$ " selon l'Équation 2.1.1 suivante :

$$TM = a + b.ID = a + b.\log_2(2A/W) \quad \text{Équation 2.1.1}$$

Cette relation rend compte du fait que des mouvements de pointage pour des amplitudes très grandes vers des cibles larges requièrent à peu près le même temps que des mouvements de faible amplitude vers des cibles étroites. Des études ultérieures ont montré que la loi de Fitts révèle un conflit vitesse-précision dans le temps de mouvement qui a des implications pratiques, par exemple dans le design d'interactions homme-machine (MacKenzie, 1992).

Comme détaillé plus loin (section 2.1.2), on peut comprendre le contrôle du geste en étudiant la variabilité du mouvement, que ce soit les trajectoires ou la position finale de l'effecteur par rapport à la cible que l'on doit pointer. Sachant que le mouvement balistique est réalisé en une seule fois, le bruit neuromusculaire dans la commande motrice peut générer deux grands types d'erreurs : l'erreur de visée lors de l'initiation du mouvement et l'erreur de position d'arrêt du geste par rapport à la cible (Wolpert & Flanagan, 2010).

Dans certaines applications d'analyse vidéo par ordinateur, différentes caractéristiques cinématiques du mouvement humain sont analysées afin de pouvoir identifier et catégoriser les mouvements (pointer, lancer, coup de pied, coup de poing, ...). Ainsi, Prasad et al., (2006) sont partis du principe que le mouvement balistique implique la propulsion d'un membre (la main ou le pied) vers une cible avec une phase d'accélération initiale suivie d'une décélération pour stopper le mouvement. En conséquence de quoi, les mouvements balistiques dans les tâches d'atteinte ont un profil de vitesse en forme de cloche. Cette caractéristique permet d'isoler les mouvements balistiques d'autres mouvements appelés masse-ressort (par exemple l'écriture, faire un cercle avec la main dans le vide, des gestes de communication non verbale, etc ...) qui nécessitent une régulation en continu du mouvement. Selon ces auteurs, la forme de la

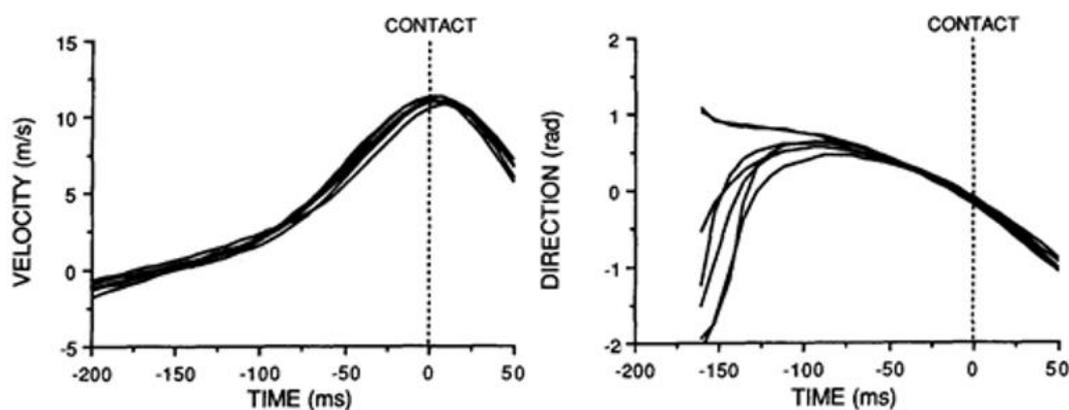
trajectoire des mouvements balistiques serait plus simple que celle des mouvements masse-ressort qui ont en général une trajectoire plus complexe avec des pics d'accélération plus faibles et des temps de mouvement plus longs, alors que les gestes balistiques sont généralement orientés vers un but, à savoir une cible statique ou mobile (par exemple un service au tennis ou au volley). Une lecture critique de cette étude suggère que la catégorie "mouvements masse-ressort" est un peu fourre-tout dans le sens où tous les gestes non-balistiques étudiés tombent dans cette catégorie. Une fois les mouvements balistiques déterminés, Prasad et al., (2006) ont mis en place une classification pour isoler deux grandes catégories de gestes balistiques : les mouvements d'atteinte et les mouvements de frappe. Contrairement aux mouvements d'atteinte, les mouvements de frappe se caractérisent par une durée plus faible, une plus grande accélération et décélération, et des profils de vitesse en cloches plus convexes (pic de vitesse plus élevé).

D'un point de vue neuromusculaire (Palmer et al., 1994), le geste balistique de pointage d'un segment du corps vers une cible engage une activité des muscles agonistes (extension de l'effecteur), suivie de celle des muscles antagonistes (début du freinage), puis à nouveau d'une activité du muscle agoniste (ajustement final du geste) (Berardelli et al., 1996). Ce pattern triphasique de l'effecteur dans une tâche de pointage mono articulaire peut être accompagné d'ajustement posturaux dans le cas où le mouvement balistique perturbe l'équilibre du corps (Chiovetto et al., 2010).

Les gestes balistiques, qu'ils soient non instrumentés (où on ne tient pas d'objet dans la main : pointage, atteinte de cible, attraper un objet, frapper, ...) ou instrumentés (marteau, tennis, ...) sont reconnaissables grâce aux caractéristiques présentées précédemment. Même si les gestes balistiques peuvent devenir cycliques, comme le « ball bouncing » où l'on fait rebondir de manière cyclique une balle de ping-pong avec une raquette (Dijkstra et al., 2004.; Kroetz et al., 2015; Sternad et al., 2000), ou frapper avec un marteau de façon répétée (Petrič et al., 2017). Dans la présente thèse nous nous concentrerons sur l'étude d'un geste balistique non cyclique consistant à frapper un objet en le faisant glisser sur une surface vers une distance cible. Dans ce type de geste, il est nécessaire de prendre en compte la force de frottement, qui résulte de l'interaction entre les caractéristiques physiques de l'objet et celles de la surface (sur laquelle il se déplace) dans l'élaboration du mouvement généré par le participant. Afin d'illustrer les différentes phases du geste de frappe d'un objet pour l'envoyer à une distance cible, on peut utiliser le cas du service au volley-ball étudié par Temprado et al., (1997). La trajectoire

balistique de la balle et le frottement de l'air en font une tâche différente de la nôtre (frottement entre deux surfaces). Cependant, ce geste se caractérise aussi par une phase d'extension du bras (en direction opposée du lancer), que l'on pourrait appeler la "phase d'armer le bras", et une phase de flexion du bras en direction de l'objet correspondant à la "phase de frappe" proprement dite. La phase de préparation du mouvement est commune à beaucoup de sports, elle est généralement suivie par le mouvement dans le sens opposé des segments anatomiques au niveau des articulations (Bartlett, 2007). Cette coordination motrice a des caractéristiques qui varient en fonction de l'expertise du sportif, comme on le verra dans la section suivante. Plus proche de notre étude, car il s'agit d'un objet se déplaçant sur une surface, on retrouve cette idée d'extension suivie d'une flexion du bras, dans le putting au golf (Craig et al., 2000).

Pour revenir au profil de vitesse en forme de "cloche" caractéristique des gestes balistiques, nous pouvons remarquer que pour un geste de frappe, le moment du contact intervient généralement au sommet du pic de vitesse, comme illustré dans l'étude de Bootsma & van Wieringen (1990) pour la frappe au tennis de table (Figure 2.1.3.). Ces auteurs ont mis en évidence que si on aligne les profils de vitesse sur le moment du contact, les données suggèrent que les participants régulent avec précision la direction de la raquette par rapport à la balle juste peu de temps avant le contact, malgré la variabilité directionnelle de l'initiation du mouvement.

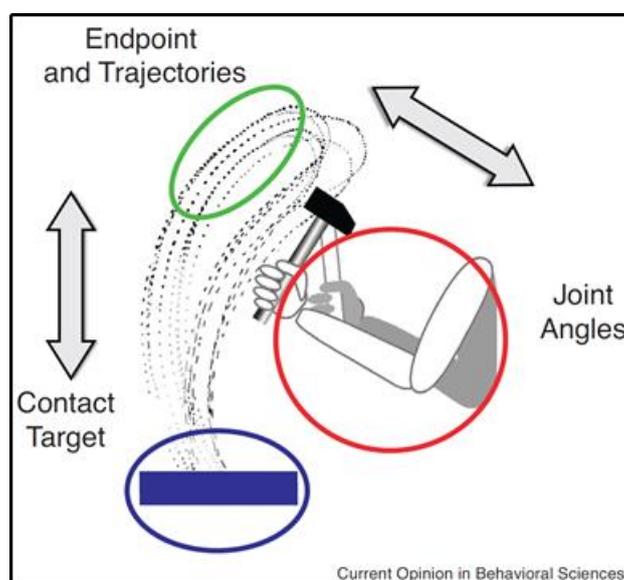


*Figure 2.1.3 Profil de vitesse et de direction lors de la frappe au tennis de table (Bootsma & van Wieringen, 1990)*

A l'instar de Schmidt (1975), on pourrait considérer que ces gestes d'extension (phase d'armer le bras) puis de flexion du bras (phase de frappe), caractéristiques de la frappe d'un objet pour l'envoyer à une distance donnée, font partie d'un programme moteur généralisé qui peut se décliner avec différents effecteurs et instruments.

## 2.1.2 La coordination motrice du geste de frappe

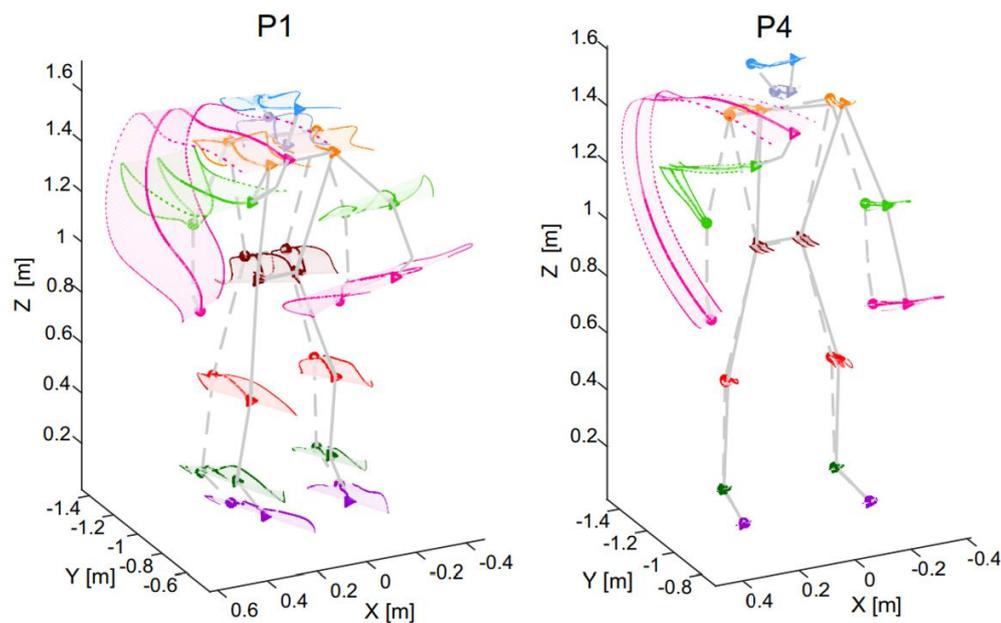
Lors de la réalisation de gestes balistiques, chaque geste n'est jamais exactement le même. Comme l'explique Sternad, (2018), il existe plusieurs sources de variabilité dans le geste. Le bruit sensorimoteur dans le signal transmis par les neurones, lors de la réception des informations sensorielles et l'émission de la commande motrice, est la première source de variabilité motrice. Au niveau du comportement, on peut illustrer la variabilité d'un geste de frappe en utilisant la tâche de frappe avec un marteau sur une enclume décrite par Bernstein (1967). Cette variabilité motrice résulterait de différentes sources de redondance motrice permettant de réaliser une même tâche sans répéter exactement le même geste (Müller & Sternad, 2009; Sternad, 2018).



*Figure 2.1.4 Les redondances motrices lors de la réalisation d'un mouvement (Sternad, 2018), en rouge la redondance intrinsèque, en vert la redondance extrinsèque et en bleu la redondance liée à la tâche.*

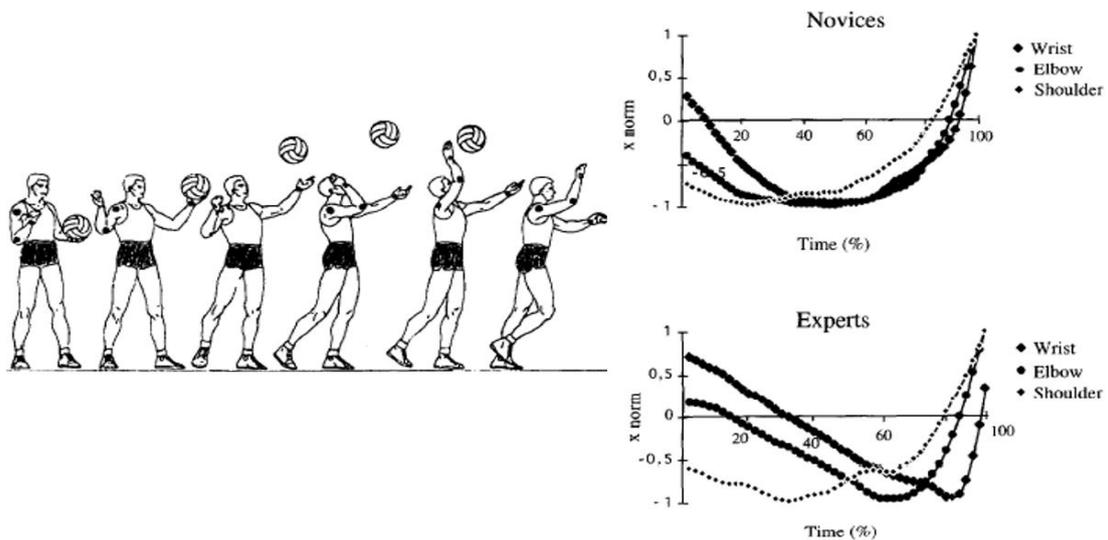
La redondance intrinsèque représente les multiples combinaisons des différents degrés de liberté des segments corporels pour contrôler la position de l'effecteur terminal représenté dans la Figure 2.1.4. par la tête du marteau. La redondance extrinsèque se définit comme étant l'infinité des trajectoires possibles pour amener l'effecteur terminal à une même cible, ici l'enclume. Il y a finalement la source de redondance propre à la tâche qui doit être effectuée. Dans notre exemple, on peut citer le fait que l'enclume offre de multiples points de contacts, cette cible n'est donc pas un simple point mais une aire.

Au niveau individuel, on peut distinguer deux types de variabilité : a) la variabilité inter-sujets qui reflète le niveau d'expertise motrice (fruit de l'apprentissage moteur) mais également des préférences individuelles, et b) la variabilité intra-sujet qui représente l'évolution des coordinations motrices au cours des essais (marqueur de l'adaptation et/ou de l'apprentissage). La variabilité dans le début de la pratique d'une tâche permet l'exploration de nouvelles solutions cinématiques qui, d'essai en essai, vont aboutir à l'optimisation de la coordination motrice la plus adaptée pour accomplir la tâche. Cette variabilité inter et intra-individuelle est au cœur de l'étude de Maselli et al. (2019) et elle est illustrée dans la Figure 2.1.5. où on voit deux participants (P1 et P4) lancer un objet avec la main droite. P1 avance les pieds durant le lancer, alors que P4 garde les pieds fixés au sol. Par ailleurs, le geste de P1 est plus variable d'un essai à l'autre que le geste de P4.



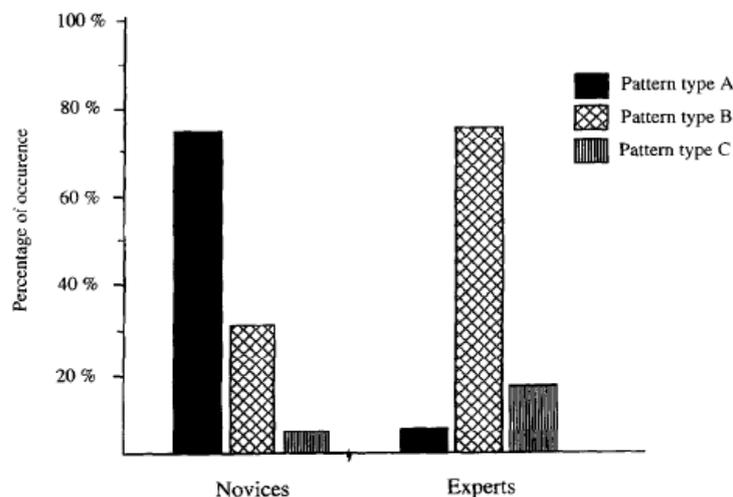
**Figure 2.1.5. Illustration de la variabilité intra-individuelle et inter-individuelle dans une tâche de lancer pour atteindre une cible (Maselli et al, 2019)**

L'étude de Temprado et al. (1997) met en avant, dans la tâche de service au volley, la différence de coordination inter-articulaire du bras qui frappe, entre des sujets novices n'ayant jamais pratiqué et des joueurs experts. Les participants des deux catégories devaient réaliser un service au volley dans le but de faire retomber la balle dans un zone cible du terrain adverse. La Figure 2.1.6. illustre les variations angulaires de différents segments au cours du temps concernant différentes articulations (épaule, coude et poignet), chez les experts et les novices.



**Figure 2.1.6. Décomposition du mouvement de frappe de service au volley et les variations articulaires spatio-temporelles normalisées entre les novices et les experts. (Temprado et al. , 1997)**

On observe que les débutants déplacent leur bras d'un seul tenant en faisant varier "en phase" les trois différentes articulations dans le même sens. Par contre, les experts font varier "en anti-phase" l'épaule et la main dans le but de donner un effet de coup de fouet à la balle. De plus, les experts sont beaucoup plus réguliers dans la réalisation de leurs mouvements d'un essai à l'autre, en termes de coordination motrice. Toutefois, on peut constater une certaine variabilité inter-sujets au sein de chaque groupe. Comme illustré dans la Figure 2.1.7., la coordination "en anti-phase" de l'expert, mentionnée précédemment, est celle qui est majoritaire dans ce groupe. Cependant, on peut retrouver cette coordination de façon moins fréquente chez les novices. Ces derniers montrent de façon plus fréquente la coordination "en phase" précitée. On trouve également une coordination intermédiaire chez certains experts, et rarement chez les novices.



**Figure 2.1.7. Fréquence des différents patrons de coordination motrice entre les novices et les experts au service au volley (Temprado et al. , 1997)**

Dans leur étude sur la taille de pierre en Inde, (Biryukova & Bril, 2008) ont montré que le pattern de mouvement cinématique du bras lors de la frappe est propre à l'individu et que le plus haut niveau d'expertise se caractérise par une grande flexibilité dans le mouvement. Une étude complémentaire (Biryukova et al., 2015) montre que la différence dans le niveau d'habileté motrice réside plus dans la variabilité du mouvement plutôt que dans le contrôle d'un paramètre cinématique particulier. La variabilité dans le mouvement de l'expert en taille de pierre apporte plus de solutions cinématiques pour détacher un éclat de roche. Ce résultat semble cohérent avec le constat qu'en général il est nécessaire de diminuer la variabilité dans les degrés de liberté quand on découvre une tâche motrice, ce qui serait plus fréquemment observé chez les novices (Sternad, 2018).

La coordination motrice est sous-tendue par des synergies musculaires que certains appellent aujourd'hui "primitive motrice". En effet, en neurosciences, les primitives motrices sont définies comme étant des blocs fondamentaux permettant de construire le mouvement (Giszter, 2015). Les primitives motrices sont apparues très tôt dans l'évolution et leurs complexités ont évolué en fonction des espèces. On peut distinguer trois types de primitives motrices (Figure 2.1.8.).

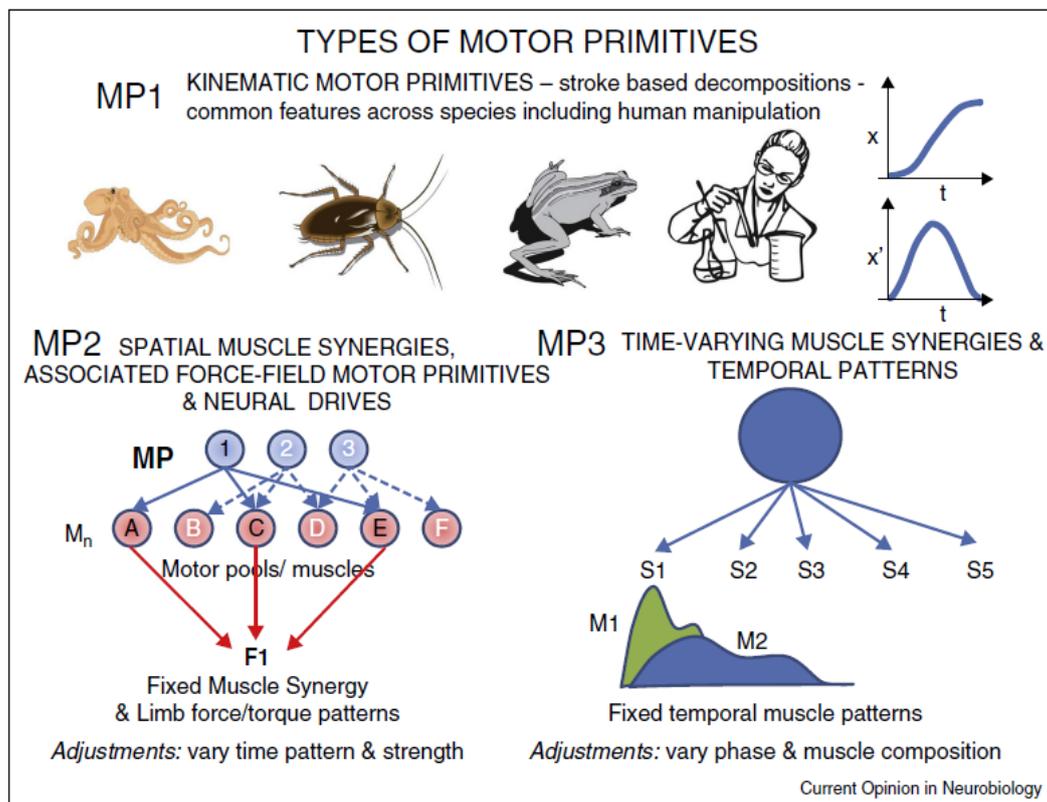
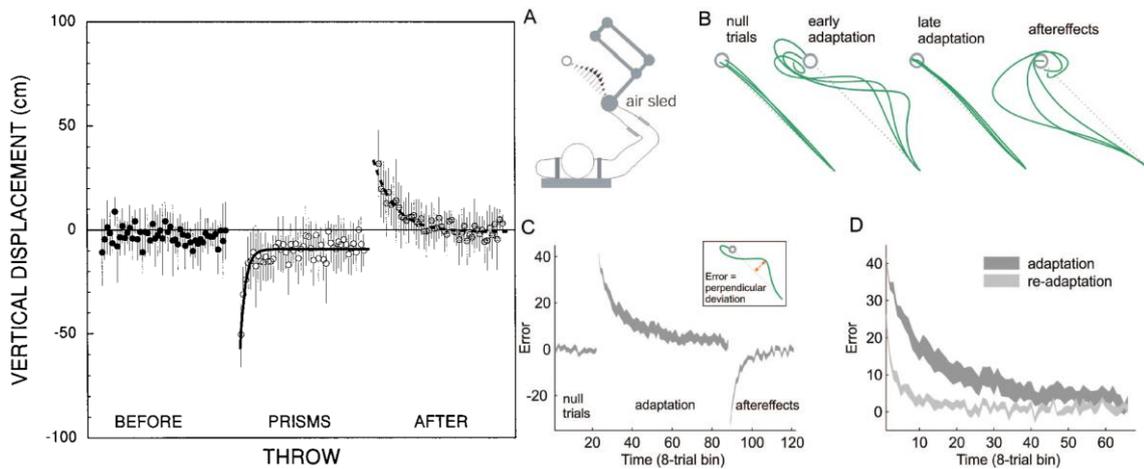


Figure 2.1.8. Trois niveaux de classification des primitives motrices (d'après Giszter, 2015)

Le premier type de primitive motrice porte sur les éléments cinématiques du mouvement, par exemple, le profil de déplacement et de vitesse des articulations entraînant les segments corporels indépendamment des forces mises en jeu pour effectuer un mouvement particulier. Le deuxième type de primitive motrice montre la prise en considération par le système nerveux des synergies musculaires spatiales dues à la force générée par la contraction des muscles et leurs propriétés viscoélastiques pour générer le mouvement requis. Le troisième et dernier type de primitive motrice concerne la variation des synergies musculaires au cours du temps et la variation temporelle des patterns de mouvements. Dans notre travail de thèse, nous nous concentrerons principalement sur le premier type de primitive motrice car nous avons étudié les éléments cinématiques du geste de frappe en termes de coordinations motrices, sans examiner les activités musculaires à l'origine du geste.

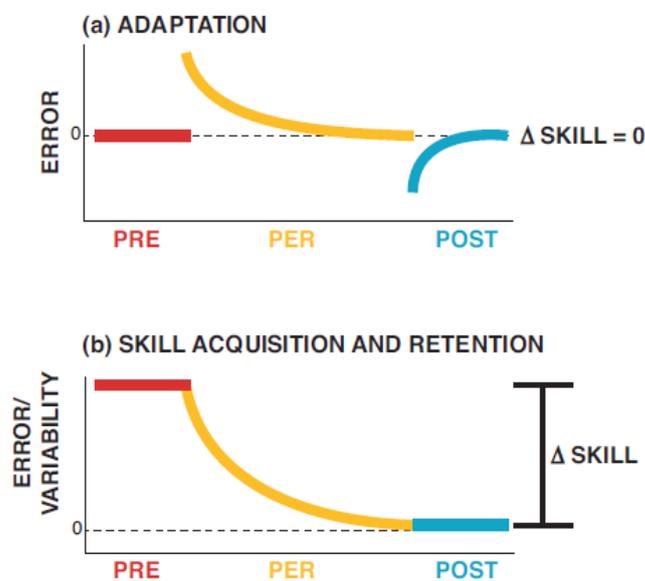
### **2.1.3 Améliorer la performance motrice : adaptation versus apprentissage**

Dans le cas de gestes balistiques rapides tels que le lancer de fléchettes, la variabilité dans le mouvement fait que l'on n'atteint jamais exactement le centre de la cible à chaque lancer. Toutefois, on peut constater que la répétition des essais tend à diminuer l'erreur de performance jusqu'à atteindre un niveau relativement stable. Si on change les conditions environnementales ou au niveau de l'individu, un phénomène d'adaptation est observé consistant en une augmentation de l'erreur (ou de la durée du geste) qui diminue ensuite d'essai en essai en suivant une fonction exponentielle. C'est illustré dans la Figure 2.1.9. avec l'étude de Martin et collaborateurs (2001) et celle de Della-Maggiore et collaborateurs (2015). Si, après de nombreux essais, la performance est aussi bonne que dans les conditions initiales et que l'on enlève la perturbation (port de verres prismatiques ou champ de force), on constate un "post-effet" qui se traduit par une augmentation des erreurs malgré le fait que l'on soit revenu aux conditions initiales. Ce post-effet est la preuve de l'adaptation préalable qui révèle une re-paramétrisation du geste compte tenu des nouvelles conditions. Par ailleurs, cette réadaptation concomitante au post-effet est souvent plus rapide que l'adaptation précédente.



**Figure 2.1.9.** Illustration du phénomène d’adaptation et des post-effets dans les études de (à gauche) (Martin et al., 2001) avec un lancer de fléchette avant, pendant, et après le port de verres prismatiques déviant les entrées sensorielles visuelles, et (à droite) pour un mouvement du bras avant, pendant, et après la présence d’un champ de force (Della-Maggiore et al., 2014).

L’adaptation est à distinguer du phénomène d’apprentissage qui obéit également à une loi exponentielle (dite “loi de la pratique”) mais dont la dynamique temporelle est sur une échelle de temps beaucoup plus longue, à savoir des centaines, voire des milliers d’heures de pratique. Typiquement, on utilise un test de rétention afin de vérifier la présence d’un apprentissage. En effet, si le participant a appris une coordination motrice et qu’il ne l’utilise plus pendant des semaines, il revient cependant à un niveau de performance quasi identique à celui quitté quand il utilise à nouveau cette coordination supposément apprise.



**Figure 2.1.10.** Changement comportemental dans l’adaptation (a) et l’apprentissage (b) de compétences motrices, d’après Sternad (2018).

Selon Sternad (2018) ces différences dans les dynamiques comportementales de l'adaptation et de l'apprentissage suggèrent que les processus sous-jacents aux deux phénomènes sont différents (Figure 2.1.10.). Ainsi, cette étude préfère parler d'apprentissage *de novo* afin de souligner le fait que l'apprentissage d'une coordination correspond à l'acquisition et au stockage à long-terme d'un nouveau patron de coordination motrice (par ex., apprendre à faire du vélo). Tandis que l'adaptation reflèterait une recalibration du système sensorimoteur (par ex., des liens perception-action) pour faire face à de nouvelles contraintes (Bastian, 2008) telles que prendre en compte l'inertie d'un véhicule durant un freinage quand on passe de la conduite d'une voiture à celle d'un camion.

## 2.2 Paramétrisation du mouvement

### 2.2.1 Du schéma moteur à la performance

Lorsque nous devons générer une action pour interagir avec notre environnement, il y a deux grandes sources de latence dans la transmission de l'information dans le corps : a) le temps que les stimuli environnementaux captés par nos sens soient transmis au cerveau pour y être interprétés, et b) le temps que la commande motrice parvienne du cerveau aux muscles (Slater-Hammel, 1960). Depuis une cinquantaine d'années, les auteurs travaillant dans le champ du contrôle moteur conviennent que le cerveau doit anticiper les conséquences sensorielles de nos actions pour faire face à ces délais. Par ailleurs, les auteurs distinguent "planification de l'action" et "régulation de l'action". La planification de l'action engage des représentations de l'action à réaliser en fonction d'une situation donnée, alors que la régulation de l'action utilise en temps réel les conséquences sensorielles et nos prédictions sur ces conséquences pour modifier le geste (à un essai donné, ou bien entre les essais).

Même si les modèles explicatifs de la planification et de la régulation du mouvement ont évolué au cours des décennies, la notion de représentation de l'action reste une constante (Adams, 1987; Schmidt & Debu, 1993). Schmidt (1975) utilise le terme "schéma" là où d'autres auteurs plus récents utilisent le terme de "modèle interne" (Kawato, 1999; Wolpert & Flanagan, 2001). La régulation du mouvement, quant à elle, peut se faire en boucle ouverte (sur la base de retours sensoriels attendus/prédits) et/ou en boucle fermée (sur la base des retours sensoriels réels). Afin d'éviter la multiplication de programmes moteurs différents (un programme par geste) générés par les représentations de l'action, "ce qui serait extrêmement lourd en termes de stockage en mémoire", Schmidt (1975) a proposé de remplacer la notion de "schéma de la réponse motrice" par la notion de programme moteur généralisé (PMG), tel qu'indiqué dans la figure ci-dessous.

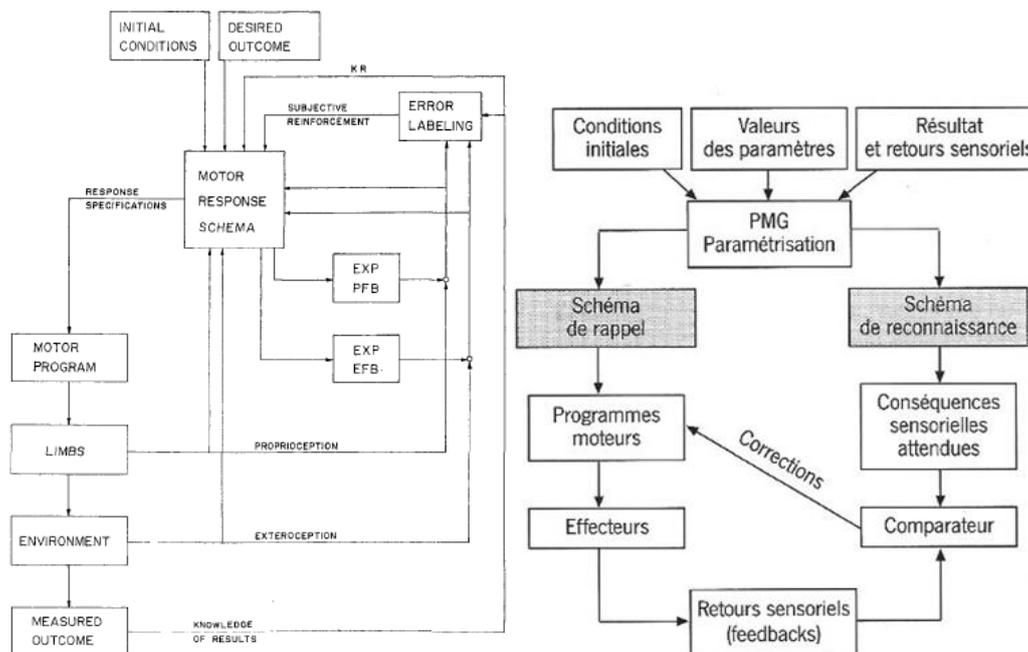


Figure 2.2.1. (Gauche) Le modèle du “schéma de la réponse motrice” pour un essai donné, où les schémas de reconnaissance et de rappel sont combinés (Schmidt, 1975); (Droite) une autre version empruntée à Marin & Danion, (2005, p.202) illustrant un schéma simplifié de la théorie de l'apprentissage selon Schmidt (1975)

Cette théorie du programme moteur généralisé (Schmidt, 2003) se fonde sur la conservation dans notre mémoire des programmes moteurs généralisés (PMG) spécifiques à une classe donnée de mouvements, par exemple : la marche, la course, le lancer, la frappe, ou l'écriture. En utilisant une analogie avec l'informatique de son temps, Schmidt décrit la notion de programme moteur (PM) comme une liste d'instructions spécifiques exécutées dans un ordre et une durée donnés qui va permettre la contraction de muscles particuliers avec une force spécifique pour la réalisation du mouvement. L'idée est que pour un PM donné, on module le programme moteur de la tâche en ajustant les paramètres de temps de mouvement, d'amplitude et de sélection du membre effecteur pour réaliser le mouvement, c'est la **paramétrisation**. Le PMG se veut indépendant des effecteurs ; ainsi, on peut écrire en tenant un stylo avec la main, les pieds, ou la bouche (Raiber, 1997). Lorsque l'on regarde de plus près un PMG, on observe que la structure des intervalles temporels de contraction des muscles pour produire des séquences spécifiques à l'action est relativement invariante. Cette notion d'invariant temporel permet de déterminer différentes classes de tâches.

Dans la théorie de Schmidt, la planification de l'action est réalisée par le "schéma de rappel" qui est à l'origine de la commande motrice. La régulation ou correction du geste se fait sur la base d'une comparaison entre les conséquences sensorielles attendues (générées par un "schéma de reconnaissance") et les conséquences sensorielles réelles. Les conséquences sensorielles attendues peuvent être proprioceptives (cf. Figure 2.2.1., "EXP PFB" pour les retours proprioceptif attendus = expected proprioceptive feedback) ou extéroceptives (cf. EXP EFB). Cette comparaison permet la génération d'une erreur (un écart entre le geste prédit et le geste réalisé) qui doit être réduite, soit au cours de la réalisation du geste, soit à l'essai suivant. Schmidt (1975, 1976) a très tôt souligné le rôle crucial de la copie efférente de la commande motrice (ou "décharge corollaire") dans la prédiction des conséquences sensorielles de nos actions :

*"Such feedforward processes occur throughout the motor system, and these are frequently referred to as efference copy or corollary discharge (Teuber, 1964)"*

*Schmidt (1976, p.62)*

Selon Schmidt, **la paramétrisation** de la commande motrice dépend à la fois de ces retours sensoriels attendus mais également des retours sensoriels réels ainsi que de conditions initiales comme la posture et l'état du monde environnant.

La théorie du PMG suppose qu'il y a deux sortes de schémas de mémorisation, Figure 2.2.1. (Droite). Il y a la mémoire de rappel qui est responsable de la production de la réponse, elle sélectionne le programme moteur adapté. Le schéma de rappel est la relation entre les paramètres du programme obtenus à chaque essai et les sorties des retours sensoriels délivrés par le mouvement. Il y a aussi la mémoire de reconnaissance qui est chargée de reconnaître l'exactitude entre, d'une part, le mouvement effectué grâce à la boucle de rétroaction et, d'autre part, l'expérience sensorielle motrice. Le schéma de reconnaissance est la relation entre les conséquences sensorielles passées, générées par le programme moteur, et le retour actuel de l'essai (Schmidt, 2003). D'après le modèle de Schmidt (Schmidt & Debû, 1993, p.69-70), c'est la durée du geste de frappe qui va déterminer la possibilité ou non d'une régulation du geste (Figure 2.2.2.). Par exemple, un coup de poing en boxe est tellement bref qu'il doit nécessairement être en boucle ouverte, alors qu'un service au tennis (où on lance la balle d'une main avant de la frapper avec l'autre) permet une régulation en boucle fermée.

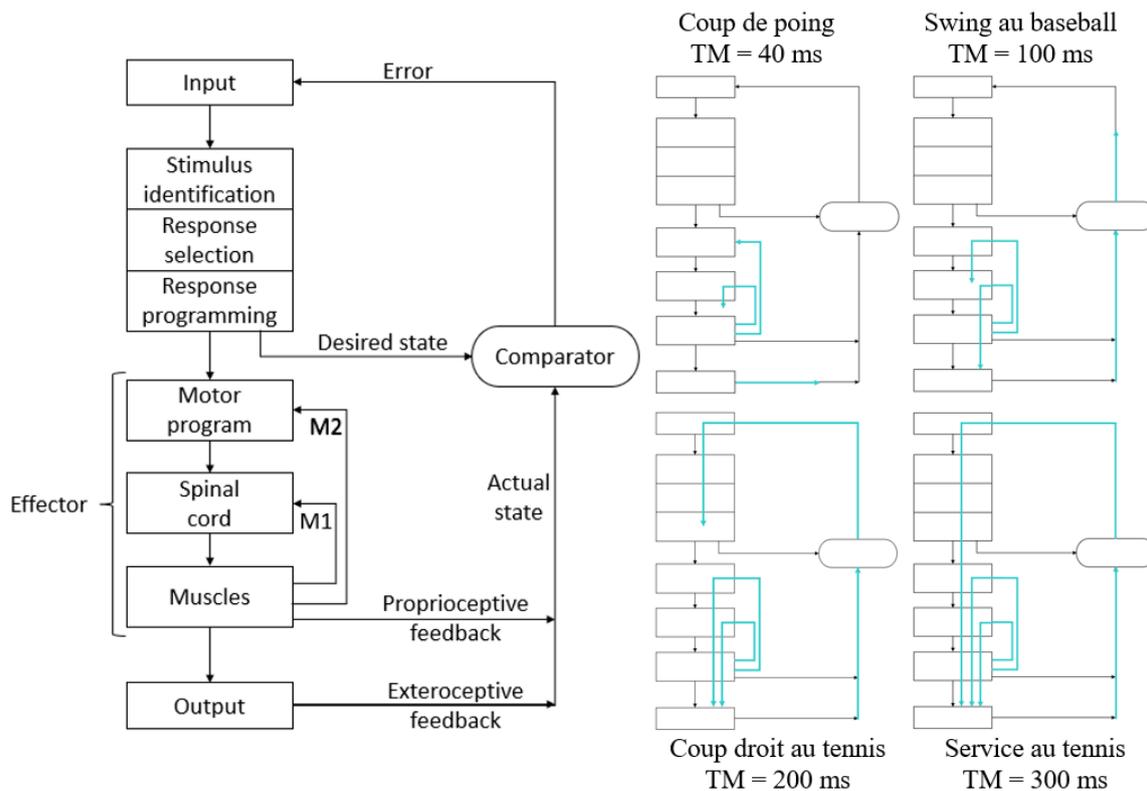
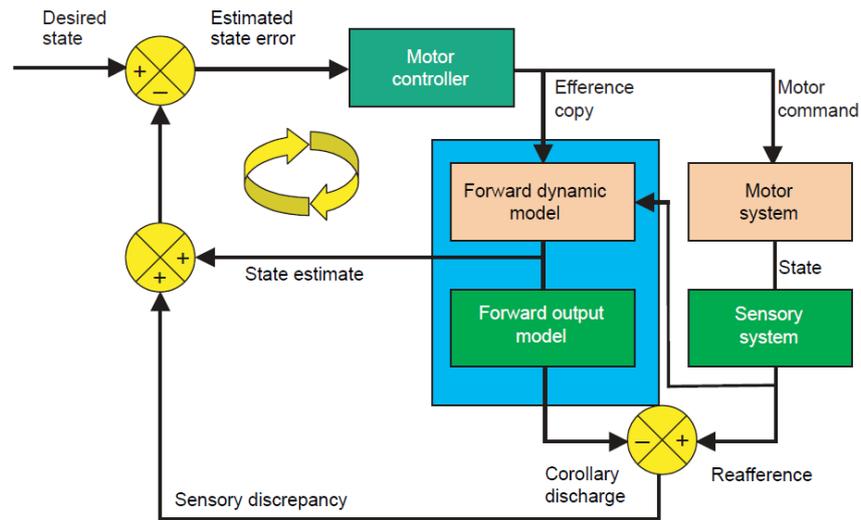


Figure 2.2.2. À gauche, le modèle conceptuel de la performance humaine, avec à droite, le progrès des différentes boucles de rétroaction en fonction de la durée du mouvement (TM) d'après Schmidt & Debû, 1993, p.69-70.

## 2.2.2 Modèle interne pour le contrôle moteur

Dans les approches du contrôle prédictif de la motricité de Wolpert & Kawato (1998), la notion de “schéma moteur” renvoie à l'idée de contrôle moteur (motor controller) comprenant les deux facettes du schéma de rappel et du schéma de reconnaissance de Schmidt, au travers du modèle interne moteur (forward dynamic model) et du modèle interne sensoriel (forward output model), comme illustré dans la Figure 2.2.3. Le modèle interne tel que défini par McNamee & Wolpert (2019) est ce qui permet à un organisme d'envisager les conséquences d'actions à partir de son état actuel sans s'engager réellement dans ces actions. Au passage, ces auteurs en profitent pour distinguer la copie d'efférence et la décharge corollaire; la première étant une copie de la commande motrice et la seconde étant la prédiction des conséquences sensorielles attendues (Ford & Mathalon, 2019). On retrouve le comparateur du modèle de Schmidt entre les conséquences sensorielles attendues et les retours sensoriels réels en bas à droite dans la Figure 2.2.3. La paramétrisation du mouvement est quant à elle assurée par le

comparateur qui se base sur l'écart entre le geste souhaité et le geste réalisé (cf. la partie en haut à gauche de la Figure 2.2.3.).



**Figure 2.2.3. Modèle neurofonctionnel du contrôle prédictif de l'action (Wolpert & Kawato, 1998). Dans les versions plus récentes de ces modèles prédictifs, Wolpert et al. ont choisi d'adopter une approche probabiliste de ces processus.**

En supposant que les mouvements de frappe correspondent à un programme moteur spécifique généralisé (Schmidt, 1975, 2003) hérité de l'évolution (Bril et al., 2012; Flash & Hochner, 2005), les participants calibreraient leur modèle interne sensorimoteur à partir d'un apprentissage continu sur la base des erreurs sensorielles issues de rétroactions (Kawato, 1999, 2009) impliquant des réseaux neuronaux cérébraux bien établis pour l'adaptation du mouvement, tels que le cervelet et le cortex pariétal. Dans le modèle probabiliste bayésien du contrôle moteur, illustré dans la Figure 2.2.4., on distingue quatre étapes dans la régulation du geste du receveur au tennis. Tout d'abord, le système perceptif crée un modèle interne probabiliste de l'état de la balle compte tenu du bruit du système sensoriel (Perception), puis, il simule la trajectoire de la balle à partir d'un modèle interne dynamique (Simulation). Dans l'étape de planification motrice (Motor planning) le joueur décide entre coup droit (forehand) et revers (backhand) sur la base d'une simulation du mouvement du corps et de la trajectoire de la balle. Enfin, une fois choisi le programme moteur (motor plan), les commandes motrices sont régulées sur la base de la comparaison entre retours sensoriels réels et prédits. On retrouve ainsi à nouveau dans la Figure 2.2.4.D-A à la fois la copie d'efférence, la décharge corollaire (appelée  $x$ ) et les réafférences sensorielles (sensory input  $y$ ) du modèle illustré dans la Figure 2.2.4.C.

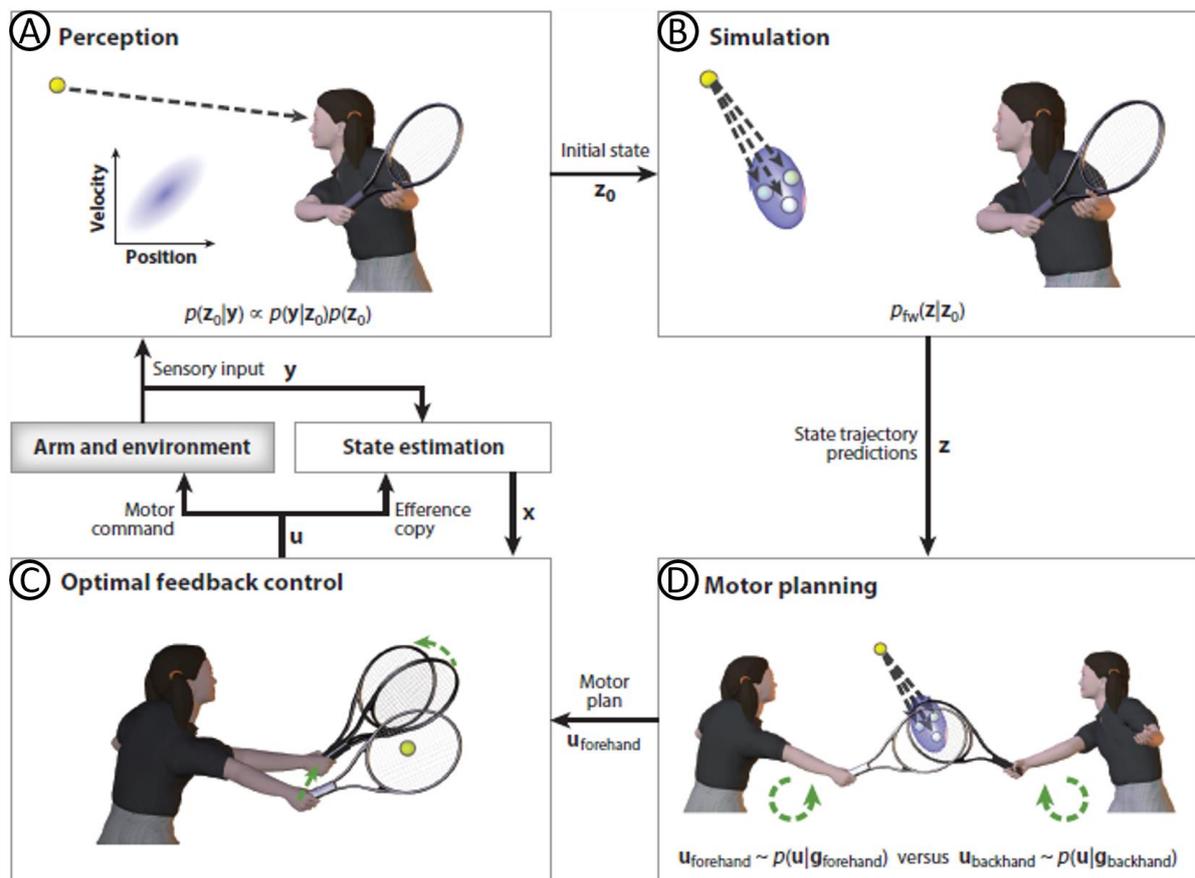
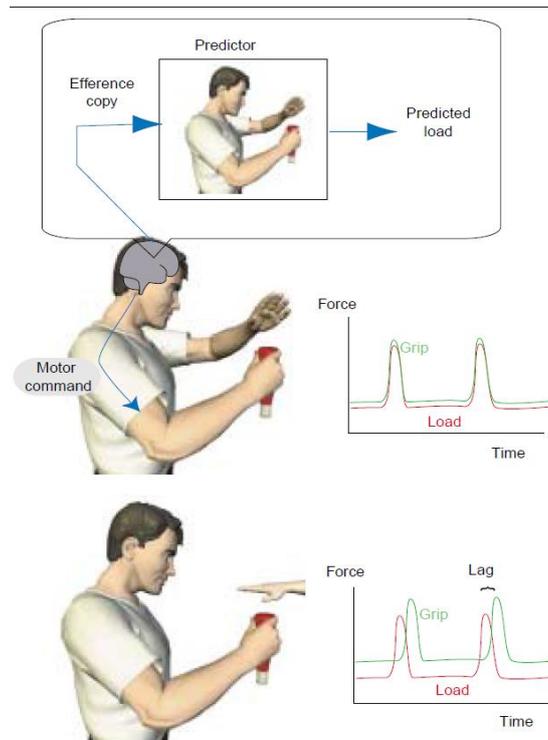


Figure 2.2.4. Rôle du modèle interne dans le contrôle sensorimoteur (McNamee & Wolpert, 2019)

La littérature sur le contrôle prédictif de la préhension montre que le cerveau prédit les conséquences sensorielles de diverses forces (friction, force de réaction, de charge, etc...) non seulement pour empêcher les objets que nous tenons de tomber (Klein et al., 2021; White et al., 2018; Wolpert et al., 2011), mais aussi pour réguler la quantité d'énergie cinétique dans des tâches telles que le putting au golf (Craig et al., 2000) ou la taille de pierre (Bril et al., 2010). Dans l'exemple classique de Wolpert & Flanagan (2001) où on frappe une bouteille de ketchup, la régulation du serrage de la main se fait de façon prédictive par anticipation des effets de la frappe en coordonnant la force de serrage (grip force) et la force de frappe à l'impact (load force), comme illustré dans la Figure 2.2.5. Sans le dire explicitement, ces auteurs supposent que le contrôle moteur utilise un modèle interne du frottement au niveau du serrage de la main pour prévenir la chute de la bouteille.



**Figure 2.2.5. Planification motrice d'une tâche de serrage pour empêcher un objet (une bouteille de Ketchup) de glisser entre les doigts lorsque soi-même ou quelqu'un d'autre frappe dessus.**

## 2.3 Modèles internes de la physique

Avant d'aborder la question du modèle interne de la friction, il convient de faire un bref rappel de physique concernant les forces de frottement. Nous étudierons ensuite la littérature traitant du modèle interne de la physique, en particulier de la friction pour la paramétrisation du geste.

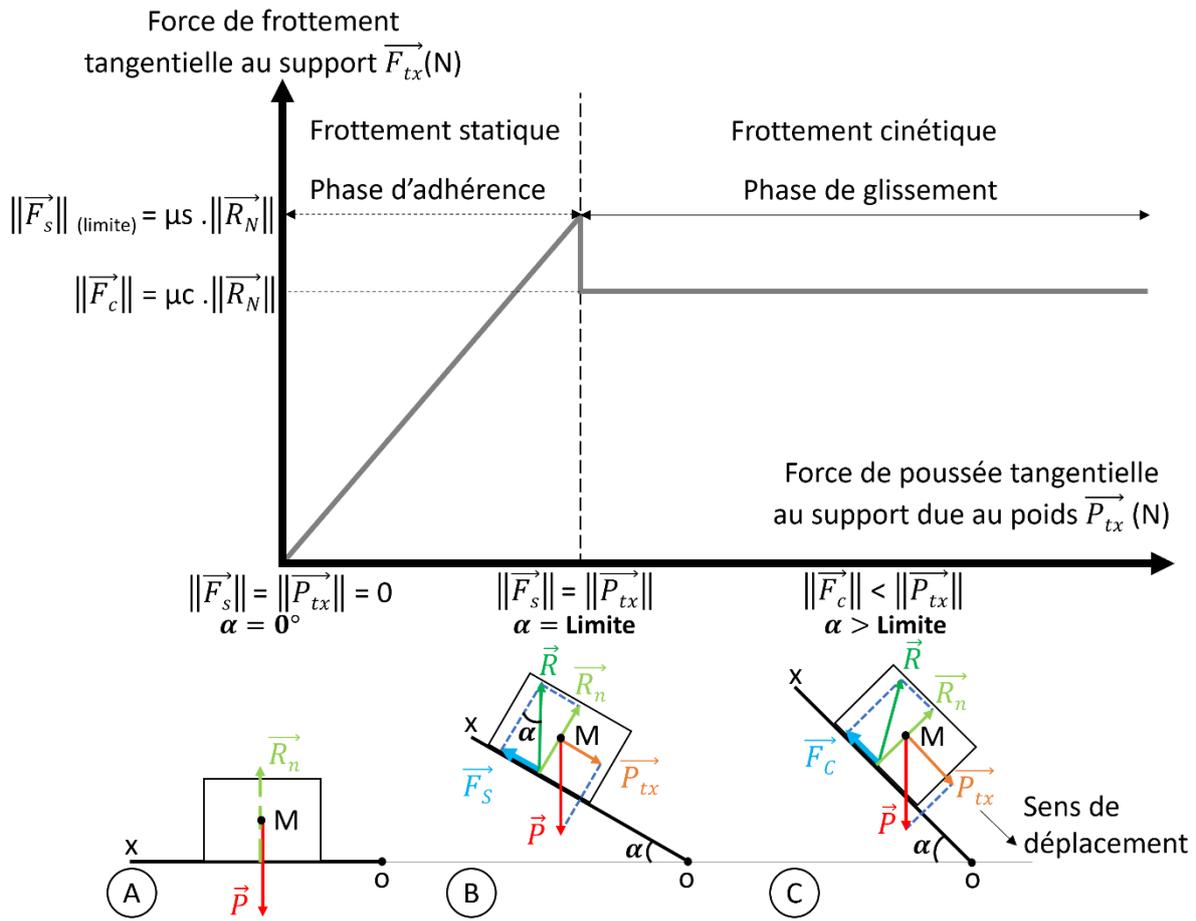
### 2.3.1 Physique d'un objet glissant jusqu'à une cible

La force de frottement peut être définie comme étant la force s'opposant à la mise en mouvement d'un objet. Dans notre cadre expérimental, l'objet qui se déplace est un pavé droit (appelé cube par simplification). La cause de sa mise en mouvement est la collision entre le bout du doigt et une face du cube. Après la collision, il n'y a plus la force de poussée qui s'oppose à la force de frottement. La conséquence est que l'objet va décélérer de manière constante jusqu'à s'arrêter. Dans cette section, nous allons caractériser les différentes forces de frottements qui s'appliquent à l'objet et la manière dont celui-ci est mis en mouvement pour glisser jusqu'à une cible. Nous parlons ici de frottements entre deux solides, aussi appelés frottements secs.

Coulombs énonce le principe que la force de frottement statique  $\vec{F}_s$  est le produit de la réaction normale du support  $\vec{R}_n$  avec le coefficient de frottement statique  $\mu_s$  propre à l'interaction entre deux surfaces (Équation 2.3.1).

$$\|\vec{F}_s\| = \mu_s \cdot \|\vec{R}_n\| \leftrightarrow \mu_s = \|\vec{F}_s\| / \|\vec{R}_n\| \quad \text{Équation 2.3.1}$$

Si l'on prend un microscope et que l'on grossit chaque surface, on observe des irrégularités même si les surfaces ont l'air lisses, visuellement et au toucher. C'est l'étude de l'ensemble des irrégularités d'une surface dans une zone considérée qui nous permet de définir la rugosité. Lorsque l'on cherche à mettre les deux surfaces en mouvement, l'encastrement des irrégularités empêche la mise en mouvement des deux surfaces, de plus, sous l'action du poids, les pics en contact se déforment légèrement et viennent épouser la forme des creux. Enfin, sur les zones en contact, il s'opère une force d'attraction faible entre les deux matériaux, appelée force de Van der Waals. Pour mieux comprendre la force de frottement, nous allons utiliser la technique d'augmentation de l'inclinaison d'une surface sur laquelle est posé un objet (Figure 2.3.1).



**Figure 2.3.1. Caractérisation des forces appliquées à l'objet pour obtenir les forces de frottements statique et cinétique.** En fonction de l'inclinaison du support, la force de traction tangentielle due au poids  $\vec{P}_{tx}$  va devenir plus importante que la force de frottement  $\vec{F}$  due à l'interaction entre l'objet et le support, ce qui va provoquer la mise en mouvement de l'objet. La distinction en  $\vec{F}_s$  et  $\vec{F}_c$  vient du fait que  $\vec{F}_s$  correspond à la force de frottement statique juste avant la mise en mouvement, et  $\vec{F}_c$  est la force de frottement cinétique durant le mouvement.

A l'horizontale (Figure 2.3.1.A), les forces qui s'appliquent à l'objet sont le poids  $\vec{P}$  et la réaction normale  $\vec{R}_n$  du support qui est de sens opposé au poids. Dans cette configuration, la force de frottement est nulle. Lorsque l'inclinaison du support augmente (Figure 2.3.1.B), on observe que l'objet reste statique sur la surface jusqu'à une certaine inclinaison avant de se mettre en mouvement, c'est la phase de frottement statique. Avec l'inclinaison, l'objet est à une position fixe le long d'une surface notée axe Ox qui a un angle d'inclinaison  $\alpha$ . Lorsque l'on projette la réaction du support dans le plan Ox, on obtient la force de frottement tangentielle au support. On projette également le poids dans le plan, ce qui permet d'obtenir la force de poussée tangentielle au plan due au poids, appelée  $\vec{P}_{tx}$ . L'angle limite  $\alpha$ , avant que l'objet se mette en mouvement, permet de déterminer le coefficient de frottement statique,

appelé  $\mu_s$ . Or, comme nous connaissons l'angle  $\alpha$  par relation géométrique, le côté opposé à cet angle est donc la force de frottement statique  $\vec{F}_s$  et le côté adjacent est la réaction normale  $\vec{R}_n$ , nous pouvons alors exprimer  $\mu_s$  comme étant la tangente de l'angle  $\alpha$  (Équation 2.3.2.).

$$\mu_s = \|\vec{F}_s\| / \|\vec{R}_n\| = \tan(\alpha) \quad \text{Équation 2.3.2.}$$

Avec cette relation, il est intéressant de noter que dans le cas de frottements entre deux solides, l'étendue de la surface en contact n'a pas d'incidence sur l'intensité de la force de frottement. Le coefficient de frottement statique est légèrement plus élevé que le coefficient de frottement cinétique (le pic de force dans la courbe de la Figure 2.3.1). Cela est dû à l'action de l'encastrement des irrégularités et à la force de Van Der Waals qui demandent un peu plus de force pour que l'objet se mette en mouvement.

Une fois le pic initial de force de frottement statique dépassé et que l'objet est mis en mouvement, la principale source de frottement est le coefficient de frottement cinétique. Ce dernier peut être calculé en se basant sur le principe fondamental de la dynamique par l'Équation suivante :

$$\mu_c = \frac{\left(\frac{a}{-g}\right) - \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \quad \text{Équation 2.3.3}$$

De façon très pratique, le coefficient de frottement cinétique se calcule à partir des données cinématiques de mouvement de l'objet (son accélération) ainsi que des propriétés du système (l'inclinaison de la surface support) et de l'environnement (la gravité). En effet, dans le cas où l'objet se met en mouvement suite à l'inclinaison de son support (cf. Figure 2.3.1) l'accélération de l'objet est due à la combinaison du frottement, de l'effet de gravité, et de l'angle d'inclinaison de la surface support, en suivant l'Équation 2.3.4 :

$$a(t) = -g[\sin(\alpha) + \mu_c \cos(\alpha)] \quad \text{Équation 2.3.4}$$

Pour conclure, nous pouvons constater que la cinématique de l'objet nous renseigne sur les propriétés physiques de notre environnement dont le coefficient de frottement est au cœur de la présente thèse. On peut formuler l'hypothèse que, perceptivement, cette spécification cinématique (via l'accélération de l'objet) de la dynamique (force de frottement, gravité, ...)

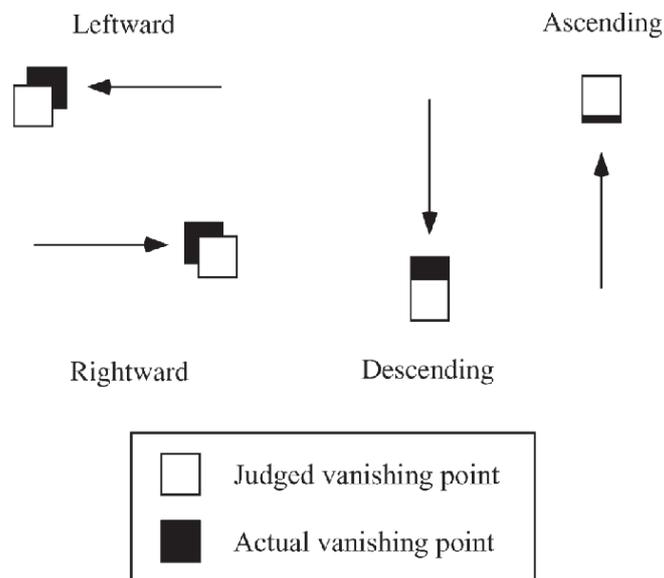
est une source d'informations essentielles dans la régulation de nos mouvements quand on se base sur les conséquences sensorielles de nos actions pour les corriger.

### **2.3.2 Modèle interne de la gravité**

Comme nous l'avons vu (Équation 2.3.1), la force de frottement est liée à la réaction du support qui est proportionnelle au poids qui dépend de la masse et de la gravité. Se pose alors la question de la perception de la gravité et de sa représentation dans un éventuel modèle interne. D'un point de vue neurophysiologique, nous avons dans le système vestibulaire des capteurs sensoriels sensibles aux accélérations linéaires, et parmi celles-ci il y a la gravité. En l'occurrence ce sont les otolithes présents dans le saccule (orientés verticalement) et l'utricule (orientés horizontalement) qui détectent les changements d'orientation de la tête par rapport à la gravité ; ce sont des inclinomètres. Les signaux vestibulaires (qu'ils soient d'origine otolithique ou émis depuis les canaux semi-circulaires) sont transmis au cerveau jusqu'au cortex vestibulaire (dans l'insula). Or, il se trouve que ce dernier est multisensoriel et répond à des stimulations visuelles comme le déplacement visuel d'objets accélérés par la gravité (Indovina et al., 2005). En conséquence, un ensemble d'auteurs propose que le cortex vestibulaire soit le siège de notre représentation interne de la gravité (Indovina et al., 2005; Lacquaniti et al., 2014, 2015; Mackrout et al., 2019; Zago et al., 2005). La perception de la gravité peut être étudiée avec la tâche d'interception d'un objet qui tombe en chute libre. Baurès et collaborateurs (Baurès, 2007; Baurès et al., 2007) apportent des éléments empiriques suggérant que cette tâche ne peut pas être réalisée uniquement sur la base du seul modèle interne quantitatif qui aurait internalisé la valeur précise de la gravité ( $9.81\text{m/s}^2$ ), mais qu'il faudrait aussi prendre en compte l'effet de la résistance de l'air. Les auteurs proposent plutôt qu'un autre type de contrôle prospectif basé sur de multiples sources d'informations visuelles, combiné à une connaissance qualitative des effets de la gravité (par exemple, il faut réagir plus rapidement quand la balle chute car elle est accélérée par  $g$ ), pourrait être suffisant pour intercepter un objet en chute libre.

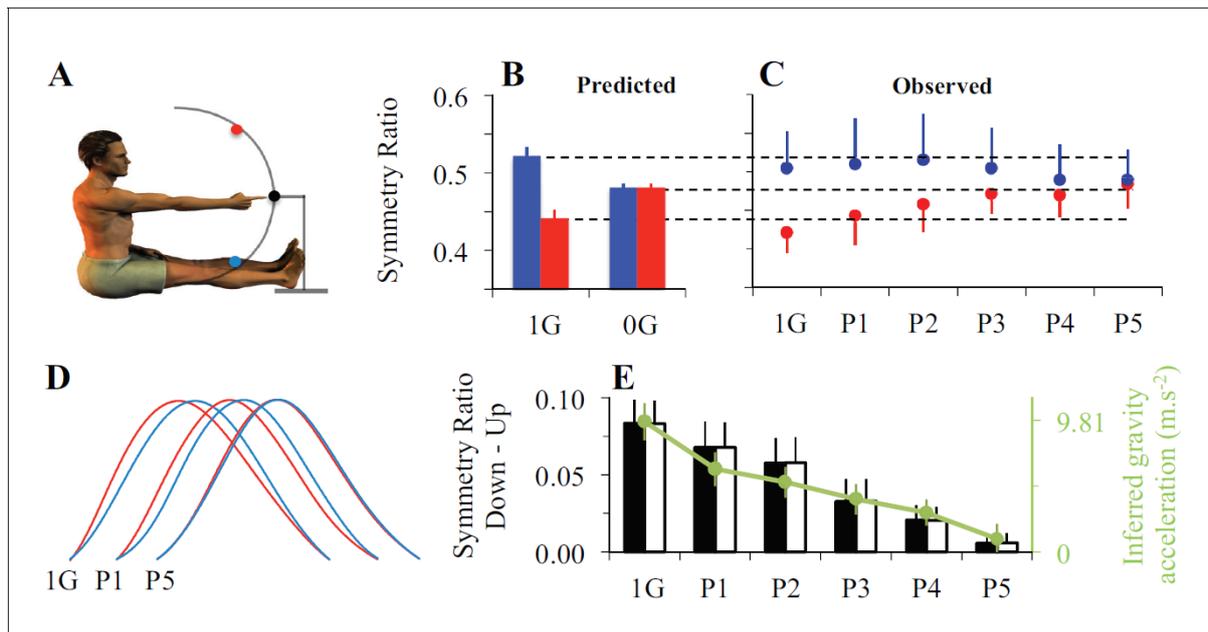
Par ailleurs, d'autres auteurs ont également montré que notre mémoire spatiale des déplacements d'objets reflétait un effet de la gravité (Hubbard, 2020). Typiquement dans les tâches dites de "moment représentationnel" mises au point par Timothy Hubbard, les participants observent un objet en mouvement (par exemple, un carré sur un écran) qui disparaît brusquement, ensuite ils doivent indiquer avec la souris quelle était la dernière position occupée

par l'objet. Leurs réponses montrent en général une position mémorisée décalée dans le sens du mouvement (effet dit de “moment représentationnel”), qui est légèrement plus vers le bas (effet de la “gravité représentationnelle”), tel qu'illustré dans la Figure 2.3.2. Si l'objet se déplace verticalement, le décalage spatial est moindre quand il va vers le haut comparé à un déplacement vers le bas. Ces effets de déplacement spatial en mémoire refléteraient probablement une influence de la dynamique physique supposée de l'objet sur notre mémoire spatiale (Hubbard, 1995b, 2005).



**Figure 2.3.2.** Illustration des effets de moment représentationnel et de gravité impliquée (d'après Hubbard, 2005)

D'autres auteurs ont également montré que ce modèle interne est pris en compte dans la régulation de nos mouvements en agissant comme une connaissance *a priori* ou “prior” dans la terminologie bayésienne (Jörges & López-Moliner, 2017). Ainsi dans leur étude princeps, McIntyre et al. (2001) montrent que nous agissons en microgravité comme si nous étions sur Terre. En l'occurrence, quand un astronaute en position assise doit attraper avec la main posée, un objet propulsé à vitesse constante depuis le “haut” (par rapport à sa tête) il produit des activités musculaires anticipées, comme s'il s'attendait à ce que l'objet accélère sous l'effet de la gravité. Par la suite, McIntyre et al. (2003) interpréteront ces travaux en suggérant que les stratégies de contrôle, qui reposent sur des estimations en temps réel du temps de contact, semblent prendre en compte un modèle interne de la gravité afin de permettre un contrôle moteur plus efficace.



**Figure 2.3.3. Illustration de l'adaptation à la microgravité dans l'étude de Gaveau et al. (2016).** (A) Position initiale des participants et positionnement des 3 cibles dans le plan sagittal. (B) Rapports de symétrie (temps d'accélération / temps de mouvement) prédits par le modèle Minimum Smooth-Effort dans des conditions de gravité normale et de gravité nulle. (C) Rapports de symétrie enregistrés expérimentalement avant (1g) et pendant l'adaptation au zéro-G (P1 à P5). (D) Profils de vitesse moyenne, normalisés en amplitude et en durée. (E) Les barres verticales représentent le rapport de symétrie moyen (axe vertical noir, à gauche) pour les données enregistrées (barres noires pleines) et simulées (barres noires ouvertes) dans des environnements à un G et à zéro G (P1 à P5).

Un autre exemple est l'étude de Gaveau et al. (2016) illustrée dans la Figure 2.3.3.A, où les participants réalisaient un mouvement de pointage de cible vers le haut et vers le bas. Les participants effectuaient cette tâche dans des conditions de gravité normale (1G) lors de cinq vols paraboliques (P1 à P5) en microgravité (0G). Ces auteurs ont calculé un indice de "symmetry ratio" : la durée de l'accélération du geste divisée par le temps total du mouvement de pointage. Cet indice reflète le fait que les mouvements d'accélération du bras vers le haut (en rouge dans la Figure 2.3.3.A-B) ont une durée plus courte que ceux vers le bas car, dans un premier temps, il y a une forte contraction musculaire puis les participants laissent la gravité freiner le bras. Pour les mouvements d'accélération vers le bas (en bleu dans la Figure 2.3.3.A-B) ils laissent la gravité faire tomber le bras plus longtemps afin de freiner au dernier moment le mouvement. Ces asymétries de mouvements ne se produisent plus dans les conditions sans gravité (cf. 0G dans la Figure 2.3.3.B et à la fin des vols paraboliques à P5 dans la Figure 2.3.3.C). On observe effectivement (Figure 2.3.3.C) qu'au fur et à mesure des vols paraboliques, l'asymétrie diminue de P1 à P5. Par ailleurs, Gaveau et al. (2016) ont utilisé un

modèle appelé “Smooth-Effort model” qui formule l’hypothèse que le cerveau utilise un modèle interne de la gravité pour prédire et exploiter avantageusement les moments gravitaires dans les mouvements accélérés et décélérés que cela soit vers le bas ou vers le haut. Or, ils montrent que ce modèle prédit correctement les résultats observés (cf. Figure 2.3.3.B-C).

### **2.3.3 Une perception multisensorielle de la friction**

Dans la tâche de frappe que nous avons utilisée, nous faisons l’hypothèse que le participant estime de façon indirecte la friction entre l’objet et la surface sur laquelle il se déplace. En effet, le participant n’est pas autorisé à explorer haptiquement ni l’objet, ni la surface. Les seuls retours sensoriels sont les conséquences visuelles et haptiques de la collision entre le doigt et l’objet lancé qui glisse sur la surface. Toutefois, dans la vie quotidienne, la friction peut être perçue en explorant les objets et les surfaces haptiquement et visuellement.

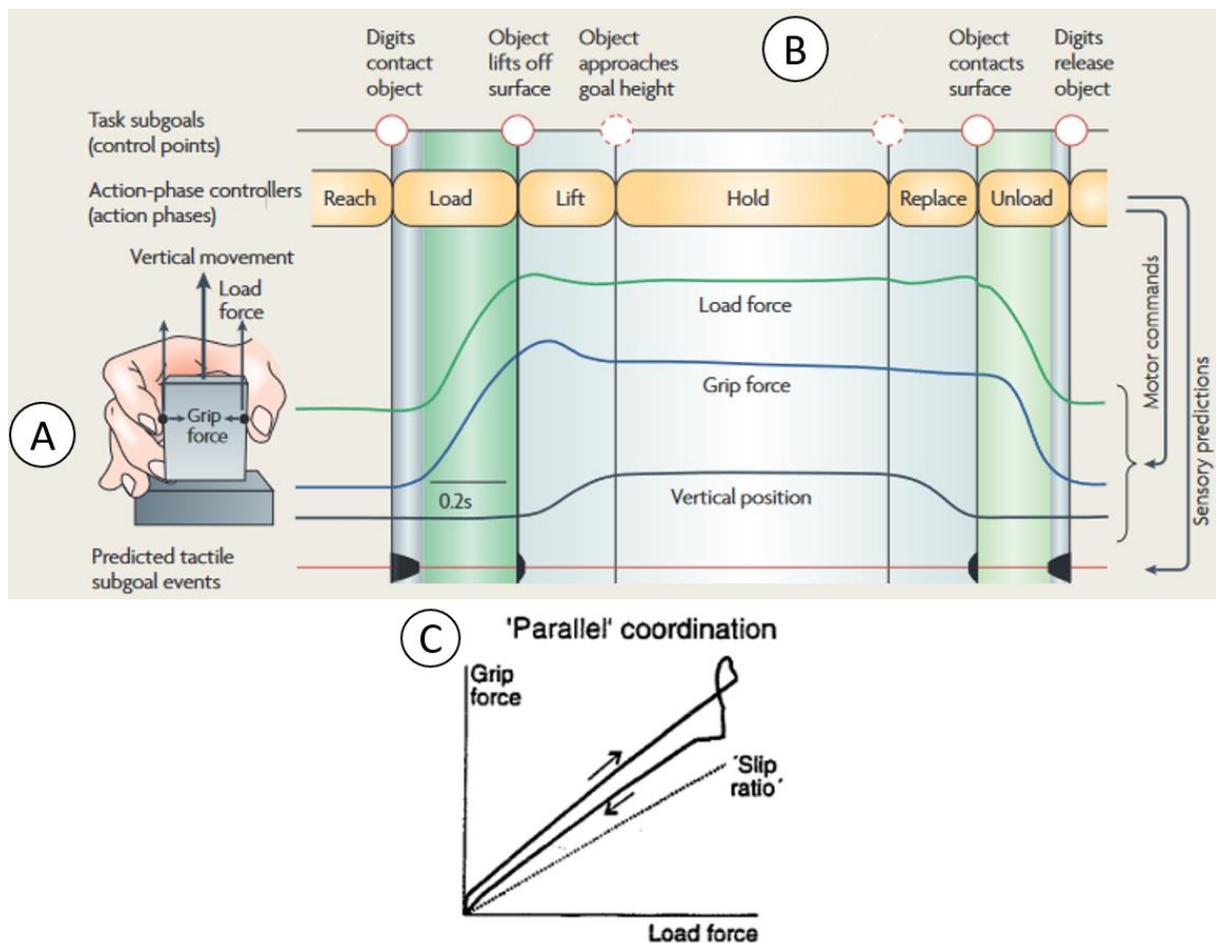
#### **2.3.3.1 Distinguer haptiquement rugosité et friction**

Comme nous l’avons vu avec la tâche de frappe sur une bouteille de ketchup (Wolpert & Flanagan, 2001), l’être humain semble avoir une représentation interne de la force de frottement car il synchronise la force de serrage avec la frappe au moment de l’impact pour éviter que la bouteille glisse. L’un des moyens les plus intuitifs pour avoir un aperçu du frottement entre la main et une surface est de la toucher et de l’explorer manuellement pour en extraire ses propriétés physiques, grâce à la perception haptique. Celle-ci peut être définie comme “un système perceptif de traitement de l’information qui utilise des entrées provenant de récepteurs intégrés dans la peau, ainsi que dans les muscles, les tendons et les articulations” (Loomis & Lederman, 1986). En effet, la perception haptique est considérée comme un système perceptif composé de deux sous-systèmes afférents, à savoir le système cutané et le système kinesthésique/proprioceptif. La perception haptique implique le plus souvent une exploration manuelle active (Lederman & Klatzky, 2009). Dans leur revue de littérature, Klatzky et collaborateurs (2013) font la distinction entre la perception de la rugosité et la perception de la friction (glissement). La rugosité est la somme de toutes les aspérités et des pics présents au niveau macroscopique et microscopique sur une surface. Les mouvements latéraux de faible amplitude permettent de percevoir la rugosité d’un objet et nous renseignent sur la texture de sa surface (Dépeault et al., 2008). La perception de la texture d’un objet est meilleure lorsque l’on explore dynamiquement la surface plutôt que de la toucher statiquement (Lederman & Klatzky, 2009). Klatzky et collaborateurs (2013) décrivent la perception de la

friction (glissement) comme la perception subjective du caractère glissant ou adhésif d'une surface. La modalité haptique est combinée avec la modalité visuelle afin d'extraire des informations sur la géométrie et la propriété des matériaux (Kajimoto et al., 2016). Kitada (2016) apporte des données neurophysiologiques suggérant que cette combinaison sensorielle permettrait de créer en mémoire une banque de données sur les propriétés des matériaux. Si, à l'avenir, nous sommes à nouveau confrontés à une surface, l'identification visuelle de la surface nous permettra de nous rappeler des propriétés des matériaux (dont la rugosité, la dureté, etc...) de la surface et peut nous permettre d'extrapoler la friction sur la base de nos souvenirs.

### **2.3.3.2 La préhension**

Le cerveau humain doit composer avec la force de friction lorsque nous manipulons des objets, notamment lorsque nous saisissons un objet entre le pouce et les doigts opposés pour le soulever et le reposer. Cette tâche a été très étudiée dans la littérature, en particulier pour comprendre comment la friction est prise en compte dans la commande motrice. Comme l'expliquent Johansson & Flanagan (2009) dans leur revue de littérature, lorsqu'un participant doit soulever un objet avant de le reposer (Figure 2.3.4.A), il doit appliquer sur l'objet une force tangentielle (sur la surface où il serre l'objet) nécessaire pour vaincre la gravité (Load Force = force de charge) ainsi qu'une force perpendiculaire pour serrer l'objet (Grip force = force de serrage) afin qu'il ne glisse pas entre les doigts. La Figure 2.3.4.B illustre l'enchaînement des points clés du contrôle sensorimoteur pour effectuer cette tâche, où la force de serrage s'avère être légèrement supérieure à la force de charge pour lutter contre la gravité et empêcher l'objet de glisser entre les doigts. Le ratio de glissement (slip ratio) de la force de serrage rapportée à la force de charge est le seuil au-delà duquel l'objet ne glissera pas, tel qu'illustré dans la Figure 2.3.4.C. Une mauvaise anticipation de la friction conduira à faire glisser l'objet si les forces ne sont pas suffisantes, ou à briser l'objet (par ex., un gobelet) si les forces sont trop importantes.

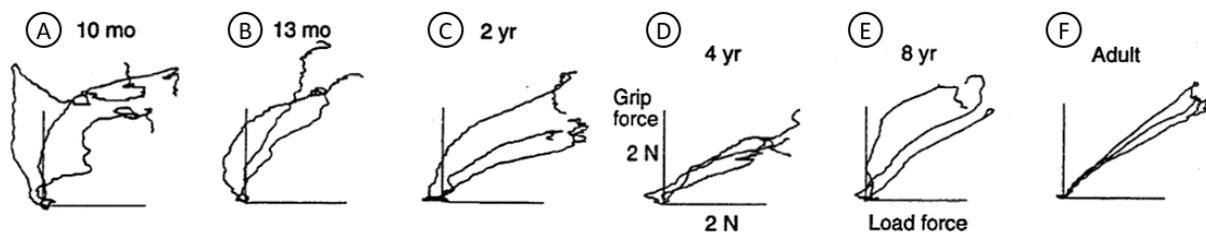


**Figure 2.3.4. Illustration schématique de la tâche de soulèvement.** (A) Tâche de lever, (B) Coordination séquentielle et événements de contrôle discrets et (C) Coordination Parallèle (cf texte). (Johansson, 1996; Johansson & Flanagan, 2009)

Ainsi, Johansson & Westling (1984) ont montré que dans ce type de tâche la force de serrage est modulée par les propriétés physiques de l'objet, en particulier la friction et le poids de l'objet. Ils ont manipulé la friction entre la peau glabre et la surface en contact (soie, velours de cuir et papier de verre) ainsi que la masse de l'objet (200g, 400g et 800g). Les auteurs montrent que lorsque l'objet est en l'air, des glissements de courtes durées entre l'objet et la peau peuvent intervenir générant des vibrations ce qui entraîne des petits ajustements du ratio de forces (serrage / charge). On observe aussi des ajustements dans des expériences où le coefficient de friction est modifié par l'ajout de substance à la surface de l'objet. Ainsi, Cadoret et Smith (1996) ont examiné l'effet de la modification du coefficient de friction sur la force de serrage avec un dispositif ayant une surface lisse ou texturée, en ajoutant celle-ci, soit une substance lubrifiante diminuant la friction (Talc), soit une substance adhésive augmentant la friction (eau et sucrose). Plus le coefficient de friction entre la peau et la surface est élevé, plus

la force de serrage est faible. L'ajout de substances adhésives comme le sucrose augmente la friction des surfaces lisses par rapport aux surfaces texturées, ce qui entraîne une diminution de la force de préhension à mesure que la friction augmente. La friction semble être un facteur plus important dans la détermination de la force de serrage que la texture seule, du moins pour la gamme de textures et de revêtements examinés dans cette étude. Par ailleurs, André et collaborateurs (2008, 2009, 2010) se sont intéressés à l'influence de la moiteur de la peau sur le serrage lorsque l'on soulève un objet. Leurs résultats montrent que la peau humide produit une qualité de frottement supérieure à celle de la peau sèche ou mouillée. Ils ont également pu mettre en avant que le niveau d'humidité au bout du doigt varie chez un même sujet et aussi d'un sujet à l'autre. La force de préhension est continuellement modulée en fonction du niveau d'humidité de la peau mais, au bout des doigts, le niveau d'humidité tend à se stabiliser vers la valeur minimisant la force de préhension.

Forssberg et collaborateurs (1991) se sont intéressés à l'ajustement du ratio de forces au cours du développement, de l'enfance à l'âge adulte. Comme l'illustre la Figure 2.3.5., ce n'est qu'à partir de quatre ans que l'on constate un contrôle synchronisé des forces de serrage et de charge, ce qui suggère l'émergence d'une stratégie d'anticipation; alors qu'avant cet âge les enfants serraient fortement l'objet avant de le lever. Tout comme chez l'adulte (Figure 2.3.5.F), ils semblent enfin pouvoir anticiper les propriétés physiques de l'objet, notamment la friction. Selon ces auteurs, on passerait ainsi d'une commande motrice par rétroaction (avant quatre ans) à une commande motrice par anticipation dans la programmation du geste.



*Figure 2.3.5. La force de serrage en fonction de la force de la charge pendant les premières parties des essais de soulèvement par des enfants d'âges différents et par un adulte. (d'après Forssberg et al, 1991)*

Flanagan & Wing (1993) montrent que le système nerveux central est capable de prédire la force de charge et la cinématique du mouvement pour stabiliser l'objet, notamment dans la programmation de la commande motrice de serrage pour les mouvements verticaux et horizontaux. Par la suite, les auteurs (Flanagan & Wing, 1997) suggèrent que cette capacité de prédiction est basée sur un modèle interne de l'appareil moteur et des propriétés de l'objet, en particulier pour anticiper la force de charge afin de fournir la force de serrage précise pour

stabiliser l'objet. Saels et collaborateurs (1999) démontrent que la friction entre les doigts et la surface de l'objet est anticipée dans la commande motrice, pour la force de serrage et pour l'accélération du membre supérieur, lors de l'ajustement du ratio entre les forces de serrage et de charge pendant le transport d'objets afin d'éviter tout glissement. La friction n'affecte donc pas seulement la dynamique des forces de serrage mais aussi la cinématique du mouvement. Danion et Sarlegna (2007) demandent à leurs participants de déplacer un objet retenu par un élastique jusqu'à une certaine distance-cible. Ils montrent que le couplage entre les forces de serrage et de la charge (due à l'élastique et au poids de l'objet) est préservé malgré l'initiation de corrections rapides du mouvement du bras en réponse à des changements de distances cibles inattendus. Ils proposent que la prédiction motrice est un processus automatique en temps réel opérant pendant l'exécution et la correction du mouvement.

Babin-Ratté et collaborateurs (1999) a mis en avant que les patients ayant une dégénérescence du cervelet sont incapables d'anticiper les ajustements de force de serrage, cela suggère une altération de la prédiction cérébelleuse des conséquences dynamiques du mouvement volontaire. Le cervelet semble donc participer dans la tâche de préhension à la construction d'un modèle interne des conséquences sensorielles des forces dans l'environnement pour permettre le contrôle prédictif de la force de serrage lors du soulèvement d'objets, comme semble le confirmer le modèle neuro-computationnel de Ulloa et collaborateurs (2003). Ce modèle tient compte d'une estimation visuelle du poids de l'objet et de la texture de l'objet (afin de déterminer la friction) pour l'ajustement du couplage de la force de serrage et de la force de charge. En effet, d'autres auteurs ont montré empiriquement que modifier le délai du retour visuel affectait l'estimation du ratio de forces chez leurs participants (Sarlegna et al., 2010; Takamuku & Gomi, 2019). Enfin, la littérature sur la manipulation dextre suggère que la programmation de la commande motrice de la force de serrage dépend de l'adaptation de modèles internes construits sur la base d'expériences antérieures dans divers contextes qui sont ajustés de manière appropriée en fonction des retours sensoriels (Opsomer et al., 2018; O'Shea & Redmond, 2021).

### **2.3.3.3 La marche**

La perception de la friction est particulièrement importante pour notre organisme lors de la marche car une mauvaise appréciation des surfaces peut provoquer une glissade ou une chute qui peut avoir de lourdes conséquences sur notre santé. Joh et al. (2006) ont exploré quelles informations visuelles pourraient nous alerter sur des surfaces à faible friction (c'est-à-dire

glissantes). Après avoir interrogé leurs participants pour savoir quelles informations visuelles ils utilisaient pour identifier un sol glissant, ils ont testé si ces informations visuelles étaient vraiment perceptivement si fiables dans différentes conditions (éclairage intérieur et extérieur). Les résultats indiquent que les participants se fient à l'estimation de la brillance du sol pour choisir un chemin plus sûr et moins glissant, même si la brillance n'est pas une source d'information visuelle très fiable pour estimer un sol glissant. Cappellini et al. (2010) ont montré que le cerveau prend en compte la friction du sol en modifiant notre marche sur un sol glissant. Il module la marche pour qu'une force verticale soit appliquée par les membres inférieurs en contact avec le sol en réduisant les forces latérales. Il réduit notamment la longueur des pas. La position de la tête tend à être stabilisée dans l'espace tandis que le tronc et les bras sont plus mobiles. De plus, marcher sur une surface glissante nécessite une stabilisation des hanches et du centre de masse corporelle dans le plan frontal ; cette stabilisation s'améliore significativement avec la pratique. La prise en compte de la friction influence donc le pattern de la marche en fonction des sols sur lesquels on évolue.

Joh et al. (2007) ont étudié la prise de décision de s'aventurer sur une pente en fonction de la friction des chaussures sur le sol et de l'inclinaison de ce dernier, dans un ensemble de cinq expériences (Figure 2.3.6.). Les participants se tenaient sur une plateforme de départ horizontale face à une pente descendante d'inclinaison réglable. Dans les expériences 1 à 3 de l'étude, la plateforme de départ et la pente étaient recouvertes d'une seule surface qui variait selon les essais (vinyle glissant, tapis moelleux ou caoutchouc collant) et les participants portaient des collants en nylon en guise de chaussures. Pour les expériences 4 et 5, les participants portaient des chaussures avec des semelles interchangeables en téflon glissant ou en caoutchouc adhérent, la passerelle était toujours recouverte d'un tapis moelleux. Les participants n'avaient pas le droit de toucher la pente avec leurs pieds, sauf dans la dernière expérience. Les participants devaient estimer l'inclinaison limite de la pente sur laquelle ils pouvaient se tenir debout avant de tomber. Dans un premier temps, leurs jugements ne reposaient que sur la combinaison entre les informations visuelles de l'inclinaison et les informations tactiles de glissement ou d'adhérence de leurs pieds sur la surface du sol. Sur des pentes descendantes, les participants tendent à surestimer leur capacité à rester debout sur une surface à faible friction et à sous-estimer l'effet de la friction sur une surface dont le coefficient de friction est élevé. La précision des jugements perceptifs ne s'améliore que lorsque les participants sont en contact direct avec la pente (Expérience 5).

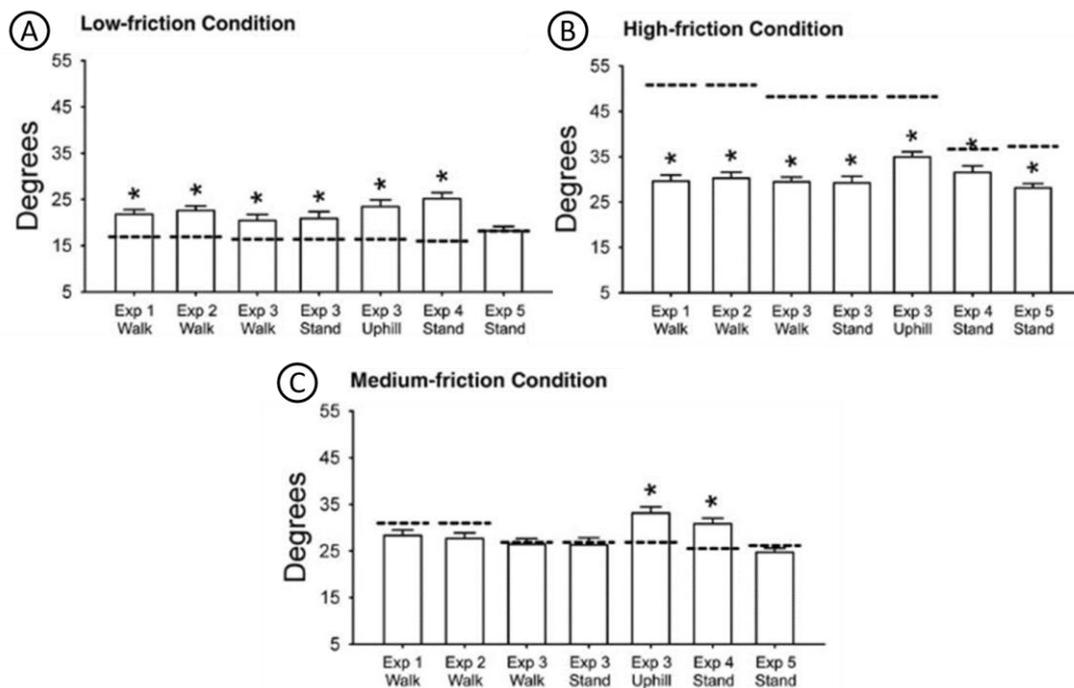


Figure 2.3.6. Jugements perceptifs moyens et seuils de glissement pour (A) des conditions de faible frottement (surface en vinyle ou semelle de chaussure en téflon), (B) des conditions de frottement élevé (surface en caoutchouc ou semelle de chaussure en caoutchouc), et (C) des conditions de frottement moyen (surface en moquette ou semelle de chaussure ordinaire) dans 5 expériences de Joh et al. (2007). Les traits en pointillés indiquent les valeurs physiques du stimulus.

## 2.3.4 De la physique naïve à la physique implicite : perception et modèle interne de la friction

### 2.3.4.1 Paradigmes de physique naïve

Certains chercheurs ont cherché à comprendre comment la représentation de la friction se construisait au fur de l'avancement dans l'âge. Larsson (2013) a réalisé une expérience de suivi longitudinal en filmant pendant 12 jours 4 enfants entre 2 et 5 ans dans leur école maternelle en analysant le moment où ils étaient confrontés à la force de frottement à la fois de manière individuelle et en groupe. Cette étude met en évidence que les enfants sont surtout confrontés à la friction durant les phases de jeu en interagissant avec des objets pour se construire une représentation de la friction, par exemple en faisant de la luge. Chez des enfants plus âgés entre 12 et 13 ans, Canlas (2019) demande une représentation visuelle sous forme de dessin et conduit des entretiens afin de connaître les idées préconçues que les élèves ont de la friction. Les résultats ont révélé que les élèves associent souvent la friction avec des objets en mouvement lorsque l'activité humaine conduit au glissement ou au roulement d'objets sur des

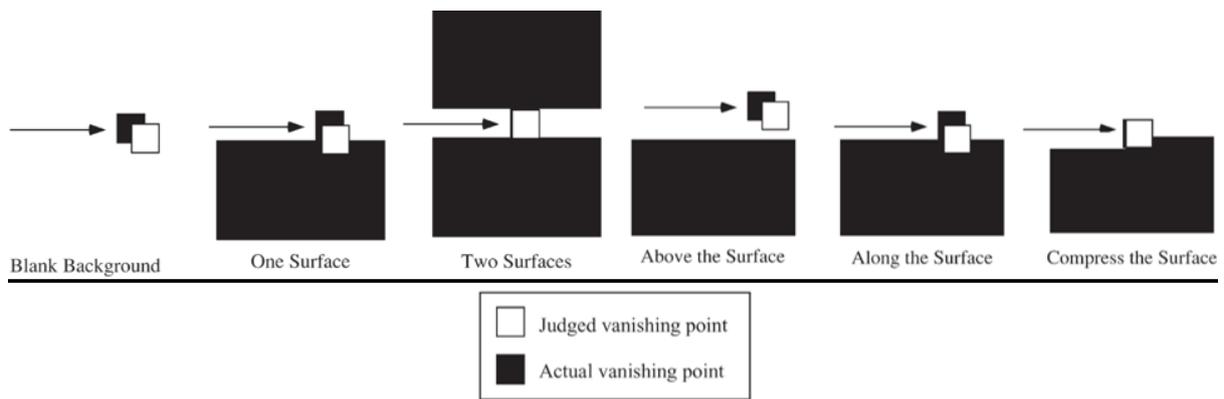
surfaces planes. Canlas semble souligner qu'il subsiste des idées préconçues, comme le prouve la non-représentation de la friction statique lorsqu'un objet est en pente et le fait que tous les élèves ayant indiqué une direction de frottement incorrecte pour les objets roulant ont été capables d'indiquer correctement la direction de frottement pour les objets qui glissent. Canlas a résumé dans un tableau ci-dessous (Figure 2.3.7.) les présupposés sur la friction que peuvent avoir certains participants tels qu'ils ont été mis en évidence par certaines études antérieures.

| Students' preconceptions on friction   | Author and year   |
|--|---|
| Friction is not a force  | Camp and Clement (2010) and Bonanno et al. (2016)                                       |
| Friction is some sort of influence that interferes with motion   | Camp and Clement (2010) and Lark (2007)   |
| Friction does not act in a particular direction  | Camp and Clement (2010)   |
| Students mostly think about solid friction at the macroscopic level and have difficulties making sense of it in the microscopic level                            | Kurnaz and Ekşi (2015), Corpuz and Sanjay Rebello (2011a) and Oktay and Kaltakci (2010) |
| Surface area of contact of sliding friction has no influence on friction   | Oktay and Kaltakci (2010)   |
| Friction was understood and correctly used for events that used the word friction when prompted but friction was absent from most explanation of situation       | Lark (2007)   |
| Students do not know that the forward friction exerted on the rear wheel of a bicycle is the only external force that pushes the bike forward                    | Chia (1996)   |
| Mostly recognize friction as a force and deny the incorrect view that friction relates only to moving objects.   | Trumper and Gorsky (1996)   |
| No friction is acting on an object that is at rest even if an external force was exerted to it and it stays at rest.   | Panprueksa et al. (2012)  |
| If there is a force of 10 N acting on a rest object on a plane and the object moving with acceleration, this means a friction of more than 10 N is acting on it. | Panprueksa et al. (2012)  |

Figure 2.3.7. Tableau de résumé d'études antérieures sur les idées préconçues des étudiants sur la friction

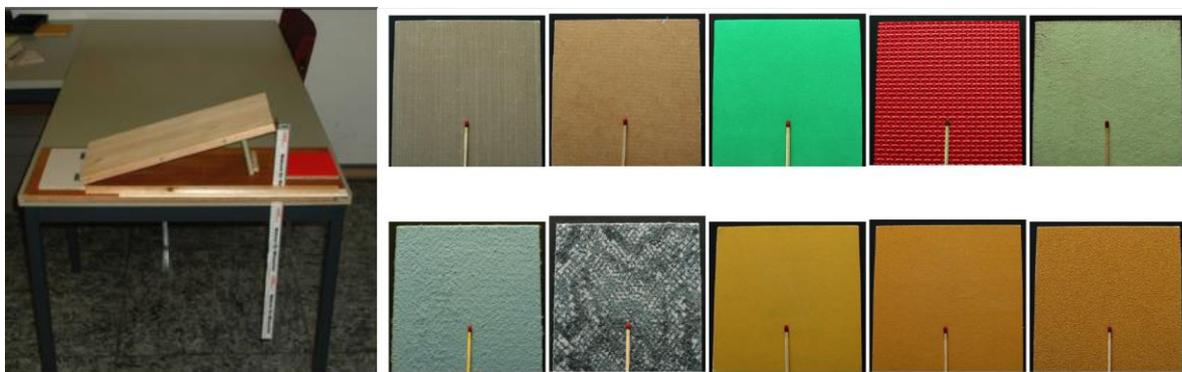
### 2.3.4.2 Paradigmes de physique implicite

Comme nous l'avons vu avec la tâche de frappe sur une bouteille de ketchup (Wolpert & Flanagan, 2001), l'être humain semble avoir une représentation interne de la force de frottement car il synchronise la force de serrage avec la frappe au moment de l'impact pour éviter que la bouteille glisse. Par ailleurs, dans une série d'études (Hubbard, 1995a, 1995b, 1998, 2005) Hubbard montre qu'il existerait une "friction représentationnelle" qui module les effets de moment représentationnel et de gravité représentationnelle. Cette "friction représentationnelle" est induite par la présence d'une pseudo surface sur laquelle se déplace l'objet en mouvement, ou bien par deux surfaces entre lesquelles l'objet se déplace (cf. Figure 2.3.8.).

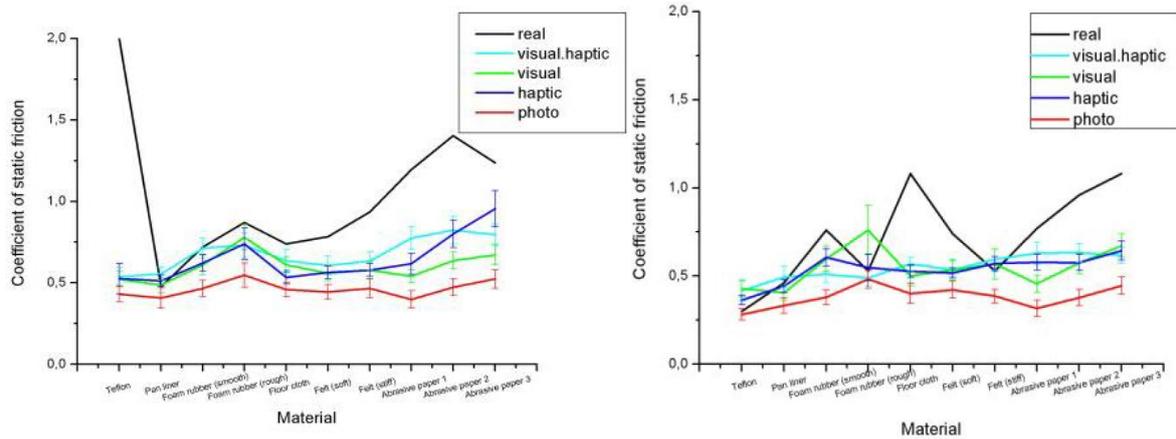


*Figure 2.3.8. Moment représentationnel de la friction extrait de Hubbard (2005).*

Ainsi, Hubbard (1995a) montre que l’effet de moment représentationnel diminue à mesure que le nombre de surfaces en contact avec l’objet cible augmente. L’effet observé sur la mémoire spatiale de l’objet est cohérent avec la notion physique que la quantité de mouvement d’un objet diminue à mesure que cet objet rencontre plus de surfaces de friction. Par ailleurs, que l’objet se déplace en contact entre deux surfaces (cf “two surfaces”) ou bien qu’il pousse une surface en se déplaçant (cf “compress the surface”), on observe un effet de “friction représentationnelle” similaire. Dans une étude complémentaire, Hubbard (1998) répète un protocole similaire expérimental dans le plan vertical. Il met également en évidence une diminution du déplacement vers l’avant des cibles quand le nombre de surfaces en contact est plus important. L’auteur (Hubbard, 2005) avance l’idée que les effets implicites de la friction semblent se combiner avec les effets implicites de la quantité de mouvement : le moment représentationnel diminue avec l’augmentation de la friction représentationnelle.



*Figure 2.3.9. (A gauche) La rampe utilisée pour mesurer les coefficients de friction estimés par les participants, (A droite) Les dix matériaux, en haut : Téflon, revêtement de casserole, caoutchouc mousse lisse et rugueuse, tissu, en bas : feutre (doux et dur), trois différentes qualités de papier de verre (320, 180, 40 dans cet ordre).*

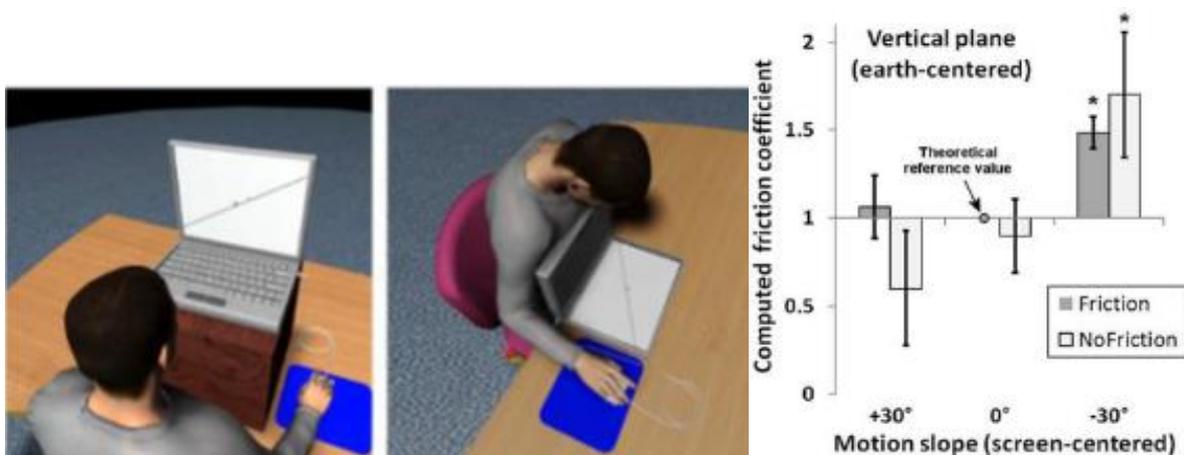


**Figure 2.3.10.** (A gauche), estimation de la friction des surfaces supposément en contact avec la peau de l'avant-bras, (A droite) estimation de la friction des surfaces supposément en contact avec du bois.

Notre estimation de la friction entre deux surfaces est plus véridique (c'est à dire plus proche des valeurs physiques) quand on combine les modalités haptique et visuelle par rapport aux conditions unimodales. Ainsi, Hecht (2015) a demandé aux participants de juger dix surfaces : du téflon, du liner, des mousses caoutchouc lisses et rugueuses, du tissu, du feutre (doux et dur) et trois différents grains de papier de verre. Les participants devaient estimer la friction entre les dix surfaces et deux surfaces de référence qui étaient la peau de l'avant-bras (du participant) et un morceau de bois lisse non traité. Il y avait quatre conditions expérimentales pour explorer les surfaces. Dans la condition visio-haptique, les participants devaient toucher les surfaces et les inspecter visuellement. Dans la condition haptique, les surfaces étaient cachées visuellement et les participants ne pouvaient les explorer que par le toucher. Dans la condition visuelle, les participants ne pouvaient inspecter les surfaces que visuellement. Dans la condition "photo de la surface", les participants fondaient leur jugement sur des photographies des surfaces. Ensuite, sur la base de ces sources d'information, les participants devaient estimer l'angle limite à partir duquel les deux surfaces se mettraient à glisser grâce à un dispositif fonctionnant avec une planche inclinable (Figure 2.3.9.). L'angle choisi par les participants permettait de calculer le coefficient de friction subjectif. Les résultats de cette expérience (Figure 2.3.10.) suggèrent que nous sommes capables de nous représenter la friction entre deux matériaux mais avec une certaine marge d'erreur. Dans le cas d'un contact entre les surfaces et la peau (Figure 2.3.10. gauche), la vision seule semble apporter des informations relativement exactes (hormis dans le cas du téflon...) pour estimer la friction peau-surface. En résumé, ces deux expériences ont permis d'évaluer si les participants sont capables de percevoir visuellement la propriété relationnelle complexe de la friction entre deux surfaces, même s'ils

ne sont pas autorisés à toucher les surfaces. Les participants sont parvenus à estimer la friction entre les surfaces mais ils ont généralement tendance à sous-estimer le degré de friction. La perception haptique de la friction n'est pas meilleure que la perception visuelle seule, et la combinaison de ces deux modalités sensorielles ne tend pas à améliorer les performances. Les informations multisensorielles n'ont donc pas amélioré l'exactitude dans le jugement des participants par rapport aux seules informations unisensorielles.

La question de la perception de la friction selon l'inclinaison de la surface est cruciale dans le cadre de cette thèse. Nos travaux sont la mise en application, dans des conditions physiques réelles, d'une étude perceptive effectuée par Amorim et al. (2015) utilisant le paradigme de lancement de Michotte. Dans son paradigme dit de « lancement » utilisant des formes géométriques simples présentées sur un écran, Michotte (1963) a mis en évidence la perception d'une relation causale entre un carré A (lanceur) qui se déplace pour entrer en contact avec un carré B (cible) initialement à l'arrêt. Si, à partir du contact, l'objet A s'arrête brusquement, et que B se met en mouvement aussitôt, alors B est perçu comme ayant un déplacement « passif » dû au contact avec le lanceur A. Si le mouvement de B continue au-delà d'une certaine distance, appelée « rayon d'action », alors B est considéré cognitivement comme ayant un mouvement autonome. Amorim et al. (2015) ont repris le paradigme de lancement de Michotte en le modifiant légèrement afin d'étudier la perception des conséquences visuelles d'une collision en s'intéressant plus particulièrement au frottement implicite dans la scène visuelle et au rôle de l'orientation de la scène visuelle par rapport à la gravité (Figure 2.3.11.).



**Figure 2.3.11.** A gauche : Dispositif expérimental utilisé par Amorim et al. (2015). A droite : représentation interne du coefficient de frottement perçu en fonction de l'inclinaison visuelle de la surface sur laquelle les objets se déplacent sur l'écran vertical.

Lors d'une collision, les participants doivent estimer à partir de quelle distance (ou quel moment) le déplacement de l'objet lancé ne semble plus être dû au lanceur (l'objet lancé semble se déplacer par ses propres moyens) en cliquant avec la souris sur l'écran (ou en appuyant sur la barre d'espace) afin d'indiquer à partir de quel endroit (ou quand) dans la trajectoire de B, ce dernier aurait dû s'arrêter. Différents facteurs expérimentaux ont été manipulés : les configurations angulaires différentes de la trajectoire des objets dans le référentiel de l'écran ( $-30^\circ$ ,  $0^\circ$  et  $+30^\circ$ ), l'orientation de l'écran par rapport à la gravité (écran vertical ou horizontal) et la présence ou non d'une ligne sur l'écran suggérant que les objets se déplaçaient sur une surface (condition « friction » vs « no friction » dans la Figure 2.3.11. droite). A partir des réponses des participants permettant de mesurer le rayon d'action, Amorim et al. (2015) ont utilisé un modèle physique pour estimer la cohérence de la friction perçue quand les objets se déplacent le long d'une surface horizontale (représentée ou non sur l'écran) et dans les cas où cette surface est inclinée. Dans le but de simplifier l'exposé des résultats obtenus, nous nous limitons à la condition dans laquelle les objets se déplacent sur un écran vertical (Figure 2.3.11.), avec un frottement implicite induit par la présence d'une surface dessinée sur l'écran (condition « friction »). En posant le coefficient de friction comme étant de valeur 1 à partir des réponses des participants dans la condition de la trajectoire  $0^\circ$  des objets, les auteurs ont étudié la cohérence du coefficient de friction des conditions  $-30^\circ$  et  $+30^\circ$ . Ils ont montré une cohérence du coefficient de frottement pour la condition  $+30^\circ$  (pente ascendante) par rapport à la physique implicite de la condition  $0^\circ$ . Par contre, pour des mouvements sur une pente descendante, le frottement perçu est 1,5 fois plus important que dans les autres conditions. Ces résultats viennent alimenter toute une littérature suggérant que notre système cognitif a incorporé les effets de la gravité et du transfert des forces ainsi que les effets des forces de frottement.

### 3. Problématique

La friction est une force avec laquelle nous devons composer dans la vie de tous les jours. Par exemple, un barman qui fait glisser sur le comptoir un verre jusqu'à un client, ou marcher sur un sol plus ou moins glissant, sont des actions communes qui pourraient nécessiter une représentation physique de notre environnement par le cerveau pour obtenir un contrôle prédictif du mouvement. En effet, lors de la marche nous glissons rarement et en général lorsque l'on fait glisser un objet vers une personne nous ne faisons pas glisser l'objet hors de la table. Comme nous l'avons vu, la question du modèle interne de la gravité a déjà été grandement abordée et débattue dans la littérature. Même si la littérature met en avant que nous sommes capables de nous représenter la friction, la perception de la friction a été relativement peu étudiée dans les tâches de frappe pour faire glisser un objet jusqu'à une cible. Il apparaît que la perception de la friction entre un objet et une surface est optimale lorsque nous combinons les modalités haptique et visuelle (Joh et al., 2007) avec cependant une légère marge d'erreur dans nos estimations. La modalité visuelle seule semble permettre à l'être humain d'estimer la friction entre deux surfaces sur la base de nos connaissances antérieures et d'en déduire un coefficient de frottement subjectif ( $\mu_{subjectif}$ ). Par ailleurs, du point de vue biomécanique, l'énergie cinétique nécessaire pour mettre en mouvement un objet à une distance donnée doit varier proportionnellement avec la force de frottement qui résulte à la fois de  $g$ ,  $\mu$ , et de l'inclinaison du support (Équation 3.1).

$$d = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2}{g[\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)]} = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2 * mass}{(g [\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)] * mass)} = \frac{KE}{(resistive\ force)}$$

Équation 3.1

En formulant l'hypothèse que la gravité et l'inclinaison du support sont correctement perçues, afin de comprendre dans quelle mesure  $\mu$  est pris en compte dans la paramétrisation de nos gestes pour faire glisser un objet jusqu'à une cible, nous avons construit un dispositif expérimental spécifique. Ce dispositif est constitué d'une table motorisée dont l'inclinaison est ajustable et sur laquelle est posée une gouttière rectangulaire dont le fond est interchangeable pour y insérer différentes surfaces. Un objet rectangulaire est placé à l'extrémité de la gouttière. Les participants avaient la consigne de faire glisser l'objet vers une distance cible en le frappant avec l'index. Avec ce dispositif, nous avons mené deux études expérimentales qui portaient sur

la perception de la friction. La première étude a servi d'expérience pilote afin de déterminer les valeurs de distance, le choix de surface (en termes de valeur de  $\mu$ ) et le nombre d'essais par condition pour l'étude principale, sans s'intéresser à l'analyse du geste. A contrario, la seconde étude a permis d'analyser la paramétrisation du mouvement du geste balistique de frappe en fonction des diverses conditions et d'examiner la variabilité interindividuelle des coordinations motrices.

**Dans ce travail de thèse**, la question fondamentale à laquelle nous cherchons à répondre porte sur la nécessité d'un modèle interne de la friction pour paramétrer un geste balistique de frappe afin d'envoyer un objet à une distance donnée. Du point de vue comportemental, l'Équation 3.1 ci-dessus suggère, d'une part, que le contrôle moteur doit se faire sur la base de la vitesse initiale de l'objet qui l'amènera à une distance donnée, et d'autre part, que l'erreur spatiale est la variable de rétrocontrôle à minimiser en termes de performance. Par ailleurs, en faisant l'hypothèse que la gravité et l'inclinaison du support sont correctement perçues, l'erreur spatiale nous permet d'estimer la valeur de  $\mu$  subjectif prise en compte dans la paramétrisation du geste. D'un point de vue méthodologique, nous avons fait le choix de commencer par des essais avec une surface horizontale, en supposant que le  $\mu$  subjectif pour chaque surface serait calibré dans cette condition et pourrait être généralisé dans les autres conditions d'inclinaison avec la même surface.

Une hypothèse secondaire, mais néanmoins intéressante, est que l'énergie cinétique qui amènera l'objet à la distance cible peut être produite avec des coordinations motrices différentes, en accord avec l'idée de la redondance motrice dans le contrôle moteur. Pour cette raison, nous avons examiné la variabilité interindividuelle des coordinations motrices, à la fois du point de vue cinématique et aussi de l'énergie cinétique, et du point de vue des stratégies spatio-temporelles impliquées dans la régulation du mouvement balistique.

# 4. Contribution expérimentale

## 4.1 Expérience 1 : Perception de la friction

### 4.1.1 Problématiques et hypothèses

Le frottement, cette force omniprésente dans notre environnement **et** qui est essentielle pour acquérir l'équilibre postural et le contrôle de nos déplacements, a déjà été bien caractérisé du point de vue de la physique. La prise en compte du frottement pour le contrôle du serrage des objets dans les tâches de préhension ou de manipulation d'objets (Klein et al., 2021; Wolpert & Flanagan, 2001) et la locomotion sur des surfaces inclinées (Joh et al., 2007), est relativement établie. A contrario, on en sait moins concernant notre perception et notre contrôle d'objet glissant sur une surface. Du point de vue de la perception de la friction, Amorim et collaborateurs (2015) ont montré que la valeur du  $\mu$  subjectif n'est pas toujours cohérente d'une inclinaison à l'autre dans une tâche de perception de la causalité. La présente thèse prolonge cette dernière étude en utilisant une tâche motrice et non pas uniquement perceptive pour estimer la valeur du  $\mu$  *subjectif* prise en compte dans la paramétrisation d'un geste balistique.

Cette expérience nous a permis de tester deux hypothèses concernant l'estimation du  $\mu$  subjectif pour faire glisser un objet à une distance cible:

- Hypothèse 1 : les informations visuelles relatives à la texture de l'objet et de la surface ne permettent pas à elles seules d'estimer  $\mu$ .
- Hypothèse 2 : les participants construisent une représentation de la friction au fur et à mesure des essais pour l'inclinaison initiale de la surface ( $0^\circ$ ). Une fois ce  $\mu$  *subjectif* calibré, les participants sont en mesure de généraliser la performance à d'autres inclinaisons sur la base du  $\mu$  *subjectif*.

L'étude de la performance essai après essai est essentielle afin de tester ces deux hypothèses. En ce qui concerne l'Hypothèse 1, la performance au premier essai permettra de révéler le  $\mu$  subjectif a priori en amont des conséquences sensorielles de la performance. Cet a priori est basé sur les connaissances et expériences antérieures du participant avec les surfaces présentées. En effet, les participants n'avaient pas d'essai de pratique et n'étaient pas autorisés

à toucher les surfaces ni l'objet. L'analyse de l'évolution de la performance au cours des essais et entre conditions permettra, quant à elle, de tester l'Hypothèse 2.

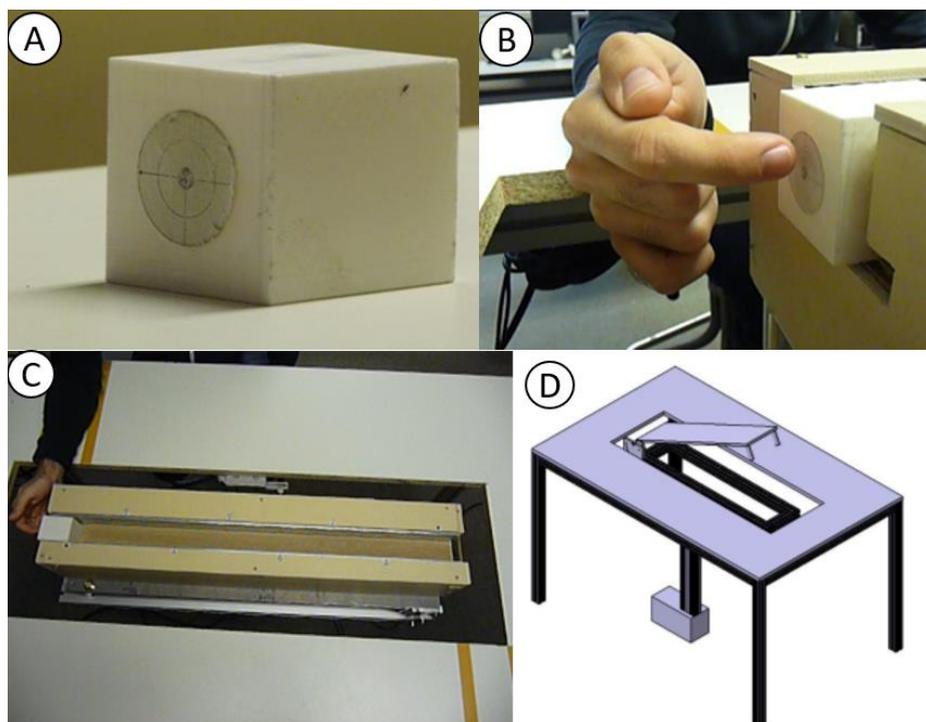
## 4.1.2 Matériel et méthode

### 4.1.2.1 Participants

Seize hommes tous droitiers dont l'âge moyen est de 24 ans ( $SD = 1.5$ ) ont participé à cette étude et donné leur consentement éclairé.

### 4.1.2.2 Configuration expérimentale

L'objet à déplacer est un parallélépipède rectangle (Longueur = 60 mm, largeur = 50 mm et hauteur = 50 mm) fabriqué en PLA (polylactide) par impression 3D, d'une masse de 46g. Une cible est collée au centre de la face de l'objet sur laquelle le participant doit frapper avec l'index pour le faire glisser (Figure 4.1.1.A) jusqu'à une distance cible. L'objet pourra par la suite être appelé cube pour plus de simplicité.



*Figure 4.1.1. Objet à lancer (A), position de départ de la main (B), gouttière dans laquelle glisse le cube (C), schéma de la table motorisée permettant d'incliner la gouttière (D).*

Au début de chaque essai, le cube dépassait de 10 mm à l'entrée d'une gouttière (Figure 4.1.1.B), dans laquelle le cube pouvait glisser de manière linéaire en minimisant les rotations latérales. Les dimensions intérieures de la gouttière étaient de 800 mm de long, de 55 mm de large, et de 50 mm en hauteur. Les bords latéraux étaient en aluminium et il y avait en dessous un espace qui permettait de pouvoir insérer une surface, une plaque d'un matériau donné, soit en vinyle, en aluminium ou en balsa en fonction des conditions expérimentales (Figure 4.1.2.). Les surfaces insérées dans le dispositif de lancement avaient 60 mm de large et 800 mm de long.



*Figure 4.1.2. Surfaces étudiées lors de l'expérience*

Les participants devaient faire glisser le cube jusqu'à une distance cible indiquée par des stickers noirs collés sur la partie supérieure de la gouttière et placés à 20cm, 40cm, et 60cm de l'arête avant du cube en position de départ (Figure 4.1.1C). La gouttière était fixée sur une table motorisée permettant à l'expérimentateur de faire varier les inclinaisons de la surface ( $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+10^\circ$ ) et d'ajuster la hauteur afin que l'index soit en face de la cible sur le cube (Figure 4.1.1.D).

### **4.1.2.3 Caractérisation du coefficient de frottement**

Afin de caractériser le coefficient de frottement statique entre le cube et les trois surfaces, un autre dispositif a été développé permettant d'augmenter progressivement l'inclinaison de la surface/gouttière à l'aide d'une manivelle jusqu'à ce que l'objet se mette en mouvement sous l'influence de la gravité (Figure 4.1.3.). L'angle à partir duquel l'objet se met en mouvement permet d'obtenir le coefficient de frottement statique (voir Équation 2 de la revue de littérature). La mesure de l'angle est fournie par un codeur d'angle placé au niveau de l'axe de rotation (Figure 4.1.3.).

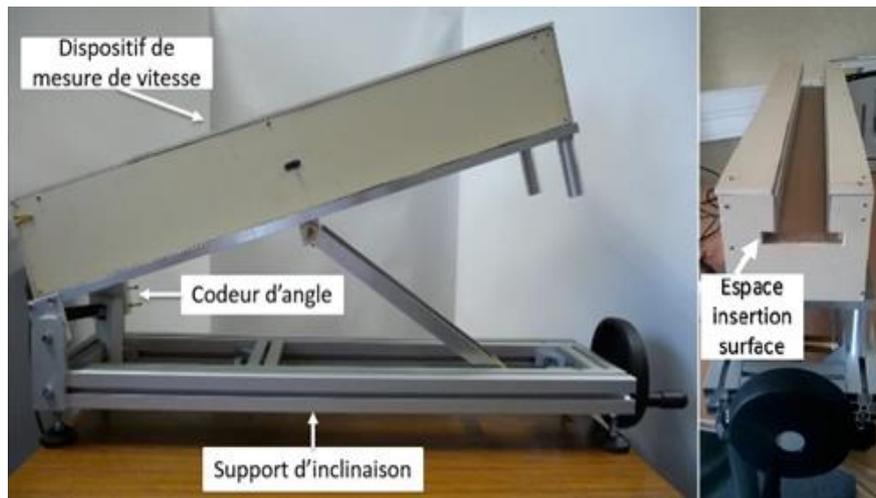


Figure 4.1.3. Support pour mesurer le coefficient de frottement statique.

On a réalisé 20 essais par surface. On augmentait l'inclinaison jusqu'à ce que l'objet se mette à glisser afin de déterminer l'angle limite à prendre en compte dans l'Équation 2.3.2. pour trouver le  $\mu_{\text{statique}}$ . Le tableau 4.1.1 résume les valeurs de coefficient de frottement statique obtenues pour chaque surface. Une ANOVA à mesures répétées a montré un effet significatif du matériau,  $F(2, 38) = 282.24$ ,  $p < 0.001$ , sur les valeurs de  $\mu_{\text{statique}}$  et des tests post-hocs de Bonferroni ont montré que les valeurs différaient significativement les unes des autres,  $p < 0.001$ . Pour déterminer le coefficient de frottement cinétique ( $\mu_{\text{cinétique}}$ ), on calculait la décélération de l'objet, durant la phase de glissement, qu'on utilisait ensuite avec l'Équation 2.3.3. pour trouver le  $\mu_{\text{cinétique}}$ . Le tableau 4.1.2 résume les valeurs de  $\mu_{\text{cinétique}}$  par matériau. Une autre ANOVA à mesures répétées a montré un effet significatif du matériau,  $F(2, 38) = 497.84$ ,  $p < 0.001$ , sur les valeurs de  $\mu_{\text{cinétique}}$  et des tests post-hocs de Bonferroni ont montré qu'elles différaient significativement les unes des autres,  $p < 0.001$ . Pour information, d'autres surfaces avaient également été testées afin de pouvoir sélectionner des surfaces dont les valeurs de  $\mu$  avaient un écart suffisant entre matériaux (voir Annexe 7.1.).

|  | Vinyle        | Aluminium     | Balsa         |
|--|---------------|---------------|---------------|
| Coefficient de frottement statique moyen | 0.27          | 0.32          | 0.52          |
| Intervalle de confiance                  | [0.25 ; 0.29] | [0.30 ; 0.34] | [0.51 ; 0.53] |

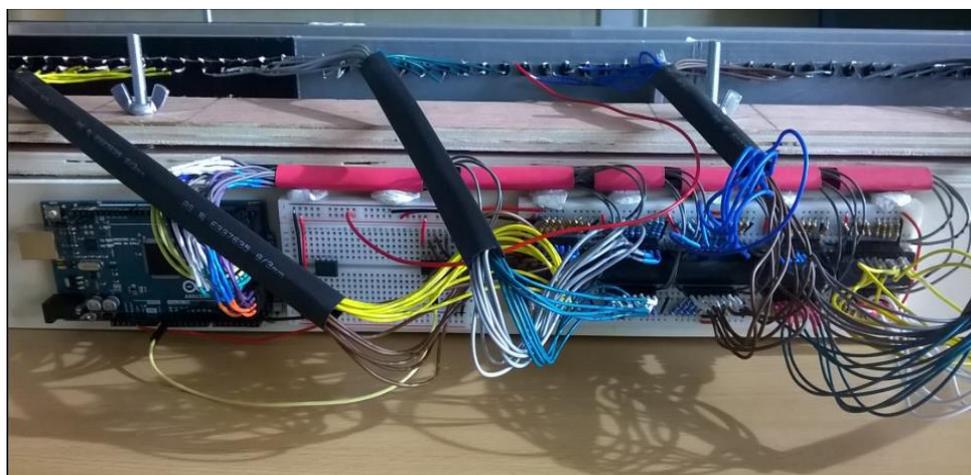
Tableau 4.1.1. Coefficient de frottement statique par surface.

|   | Vinyle        | Aluminium     | Balsa         |
|---|---------------|---------------|---------------|
| Coefficient de frottement cinétique moyen | 0.19          | 0.32          | 0.39          |
| Intervalle de confiance                   | [0.18 ; 0.20] | [0.31 ; 0.33] | [0.38 ; 0.41] |

Tableau 4.1.2. Coefficient de frottement cinétique par surface.

#### 4.1.2.4 Acquisition des données

La distance de déplacement de l'objet au cours du temps est obtenue à l'aide de portes optiques encastrées dans les parois de la gouttière. Ce système électronique illustré dans la Figure 4.1.4 permet de mesurer le temps d'interruption du faisceau lumineux entre 78 portes optiques espacées de 10mm placées en vis-à-vis sur deux rails en aluminium qui forment les bords latéraux de la gouttière. Les portes optiques sont composées d'une LED émettrice d'UV et d'une LED réceptrice (dans la même longueur d'onde) qui se font face. Lorsque le faisceau entre les deux types de LED est interrompu, on obtient la position du cube en fonction du temps. Pour minimiser l'impact des UV sur l'environnement, les LED sont recouvertes d'un boîtier. Les données des temps de passage à chaque porte sont stockées dans la mémoire de l'Arduino, puis sont lues par un programme Python qui génère un fichier Excel contenant les données.



*Figure 4.1.4. Système électronique permettant de mesurer la position de l'objet au cours du temps, grâce à une succession de portes optiques.*

#### 4.1.2.5 Tâche expérimentale

Avant chaque série d'essais, les participants devaient placer leur coude à une position standard indiquée par un autocollant sur la table pour leur permettre de faire pivoter leur avant-bras tout en gardant le coude sur la table. La hauteur de la chaise était ajustée afin que les participants gardent leur avant-bras de façon plus ou moins perpendiculaire avec la table et que leur index soit devant la cible du cube (Figure 4.1.1B&C). Lors du mouvement de frappe, les participants étaient libres d'adopter la coordination motrice qu'ils souhaitaient tant que le coude restait à la même position sur la table. Les participants avaient pour consigne de frapper le cube

pour le faire glisser dans la gouttière afin que l'arête avant du cube stoppe à la distance cible indiquée par un autocollant triangulaire comportant le numéro de la cible (voir Figure 4.1.1C). Après chaque essai, l'expérimentateur repositionnait le cube à sa position initiale, avec 5 cm du cube reposant sur la surface et 1 cm dépassant de la gouttière pour éviter la collision entre la main et le support en bois du dispositif expérimental (Figure 4.1.1B).

Trois facteurs expérimentaux intra-sujet étaient considérés : la distance cible (20 cm, 40 cm et 60 cm), le matériau de la surface (vinyle, aluminium et balsa) et l'inclinaison de la surface (-10°, 0° et +10°). Les participants effectuaient cinq répétitions par condition, soit un total de 135 essais. Les conditions distance x inclinaison étaient réalisées par blocs de matériaux. En fonction du groupe, l'ordre des blocs de matériaux allait du plus faible au plus fort coefficient de frottement (vinyle, aluminium et balsa), ou inversement (balsa, aluminium et vinyle). Pour chaque bloc de matériau, les participants commençaient toujours par la condition 0° suivie, soit de l'inclinaison -10° puis de l'inclinaison +10°, soit de l'inclinaison +10° puis de l'inclinaison -10°. Enfin, pour chaque bloc d'inclinaison, les participants réalisaient cinq lancers par distance cible. Ces blocs de 5 essais étaient ordonnés de la plus courte distance à la plus éloignée (20 cm, 40 cm, 60 cm) ou inversement (60 cm, 40 cm, 20 cm) en fonction du groupe<sup>2</sup>. (Voir tableau récapitulatif des conditions en Annexe 7.2)

### 4.1.3 Résultats

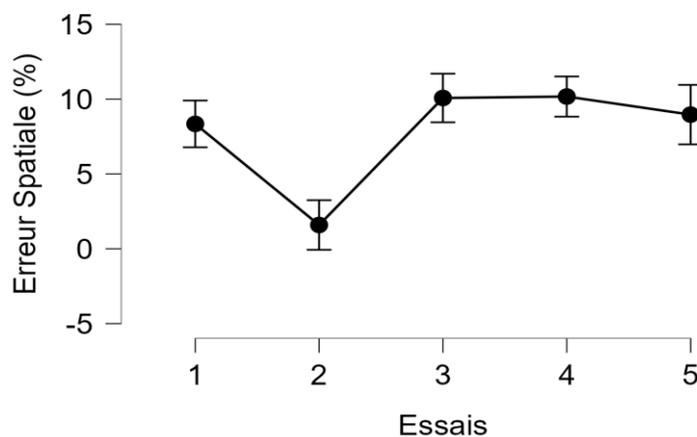
Les variables dépendantes mesurées sont l'erreur spatiale exprimée en pourcentage de la distance cible et la vitesse initiale du cube. L'erreur spatiale est définie comme étant la différence entre la distance cible et la position finale de l'arête avant du cube, exprimée en pourcentage de la distance cible. L'erreur spatiale renseigne sur le  $\mu$  subjectif que se représente le participant avant de frapper l'objet. Si l'objet s'arrête avant la cible, c'est que le participant a sous-estimé la friction qui a plus freiné l'objet par rapport à ce qu'il anticipait. A l'inverse, si l'objet s'arrête après la cible, c'est que le participant a surestimé la friction qui a moins freiné l'objet par rapport à sa prédiction. La vitesse initiale du cube nous renseigne sur la manière dont le participant a adapté son geste en fonction des conditions. En effet, le participant peut avoir tenu compte des propriétés physiques spécifiques à une condition donnée en adaptant la

---

<sup>2</sup> Même si cela ne fait pas l'objet d'analyses rapportées ici, le/la lect.eur.trice intéressé.e pourra se reporter à l'Annexe 7.4, en ce qui concerne l'effet de l'ordre de lancer ; par exemple, afin de vérifier si l'ordre de lancer à une distance plus proche vers une distance plus éloignée génère moins d'erreurs que l'ordre inverse, comme le suggère l'étude Chauvel et al., 2011 sur le putting au golf.

vitesse initiale du cube, sans que cela se traduise par une performance optimale car il n'y a pas que la vitesse initiale donnée au cube qui affecte l'erreur spatiale. D'autres variables peuvent intervenir comme l'orientation du doigt à l'impact etc. (cf. section 4.2.3.6), qui ne seront pas étudiées dans l'Expérience 1.

Des ANOVA à mesures répétées ont été effectuées sur la performance (erreur spatiale, et vitesse initiale du cube) en considérant les facteurs intra-sujets suivants : distance cible (20 cm, 40 cm et 60 cm), matériau de la surface (vinyle, aluminium et balsa), inclinaison de la surface (-10°, 0° et +10°) et essais (1 à 5). Les tableaux sont disponibles en Annexe 7.3. En effet, les différents facteurs principaux ont fait apparaître des résultats significatifs sur la performance, que cela soit en termes d'erreur spatiale,  $ps < 0.001$  ou de vitesse initiale du cube,  $ps < 0.002$ . Aussi, afin de ne pas alourdir l'exposé des résultats nous allons nous concentrer sur les interactions impliquant ces facteurs, exception faite toutefois pour l'effet essais sur l'erreur spatiale,  $F(4, 60) = 4.70$ ,  $p = 0.0023$  qui n'a pas interagi avec les autres facteurs. Des comparaisons post-hoc de Bonferroni montrent uniquement que l'erreur spatiale au deuxième essai est significativement inférieure par rapport à chacun des essais suivants,  $ps < 0.03$  (Figure 4.1.5). Par ailleurs, des comparaisons à zéro % (correction de Bonferroni) de chacune de ces moyennes montrent que seule l'erreur spatiale au deuxième essai ne diffère pas de 0%.

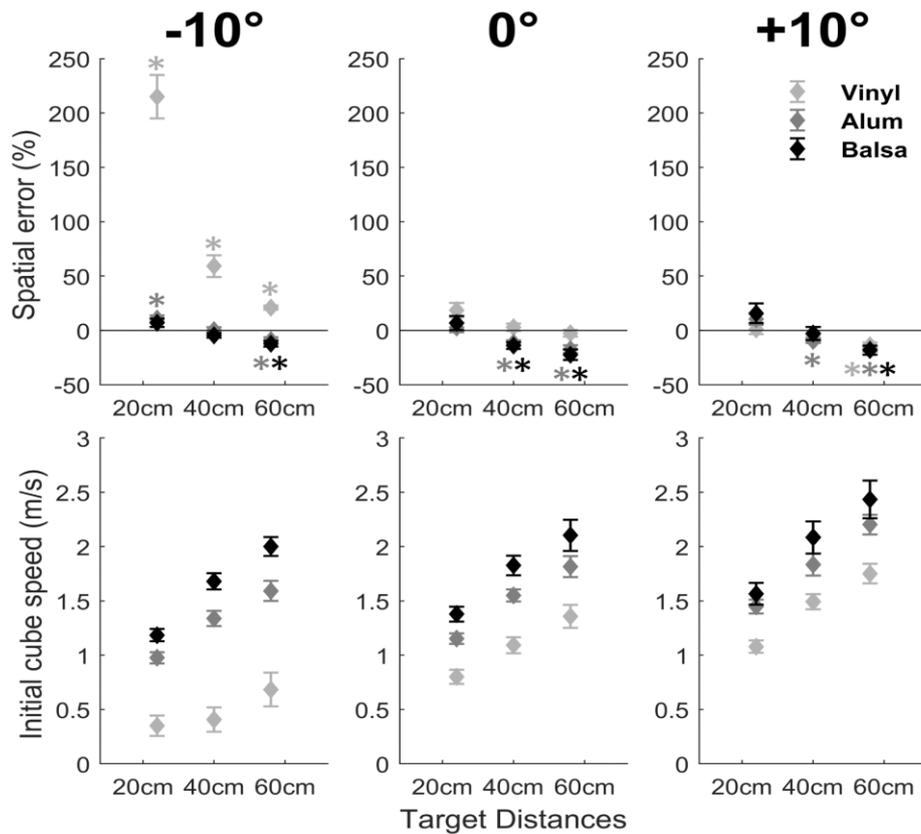


**Figure 4.1.5 Effet principal du facteur Essai sur l'erreur spatiale lors de l'expérience, (moyenne  $\pm$  erreur-type)**

Les ANOVAs sur la performance en termes d'erreurs et de vitesse initiale du cube montrent des effets d'interaction à deux facteurs (Annexe 7.3.) pour *Matériau x Inclinaison* ( $ps < 0.0001$ ), *Matériau x Distance cible* ( $ps < 0.001$ ), et pour *Inclinaison x Distance cible* ( $ps < 0.003$ ).

Parce que ces trois facteurs interagissent ensemble sur la performance, nous allons maintenant détailler cette interaction *Matériau x Inclinaison x Distance cible*, illustrée dans la Figure 4.1.6, qui s'est avérée significative pour la vitesse initiale du cube,  $F(8, 120) = 3.273$ ,  $p = 0.002$ , ainsi que pour l'erreur spatiale,  $F(8, 120) = 67.25$ ,  $p < 0.0001$ . Nous avons mené des sous-ANOVAs sur la vitesse initiale du cube par inclinaison afin de décomposer l'interaction *Matériau x Distance cible*. Ces ANOVAs ont montré que pour une inclinaison de  $-10^\circ$  il se produisait une interaction *Matériau x distance* significative,  $F(4, 60) = 13.693$ ,  $p < 0.001$ . Des comparaisons post-hocs de Bonferroni par *Matériau* ont permis de constater que les vitesses initiales variaient significativement ( $ps < 0.001$ ) en fonction de la distance, sauf pour le vinyle entre 20cm et 40 cm ( $p = 1$ ). Les deux autres ANOVA n'ont pas montré d'interaction *Matériau x distance* significative, ni pour  $0^\circ$ ,  $F(4, 60) = 1.188$ ,  $p = 0.325$ , ni pour  $+10^\circ$ ,  $F(4, 60) = 2.028$ ,  $p = 0,102$ .

Ensuite, des sous-ANOVAs sur l'erreur spatiale par inclinaison ont permis de décomposer l'interaction *Matériau x Distance cible*. Ces ANOVAs ont révélé, pour une inclinaison de  $-10^\circ$ , une interaction *Matériau x Distance cibles* significative,  $F(4, 60) = 80.243$ ,  $p < 0.001$ . Des comparaisons post-hocs de Bonferroni par *Matériau* ont montré que les erreurs spatiales variaient significativement les unes par rapport aux autres entre distances cibles pour le vinyle ( $ps < 0.004$ ) uniquement et pas, ni pour le balsa  $ps = 1$ , ni pour l'aluminium,  $ps = 1$ . L'ANOVA a également montré une interaction significative pour l'inclinaison de  $+10^\circ$ ,  $F(4, 60) = 3.695$ ,  $p = 0.009$ . Des comparaisons post-hocs de Bonferroni par *Matériau* ont montré que les erreurs spatiales ne variaient pas significativement les unes par rapport aux autres entre distances cibles pour le vinyle ( $ps > 0.14$ ). Par contre, pour l'aluminium, les erreurs spatiales variaient les unes par rapport aux autres en fonction des distances cibles ( $ps < 0.005$ ), sauf entre 40 cm et 60 cm ( $p = 1$ ). De la même façon, pour le balsa, les erreurs spatiales variaient les unes par rapport aux autres en fonction des distances cibles ( $ps < 0.02$ ), sauf entre 40 cm et 60 cm ( $p = 0.088$ ). En revanche, l'ANOVA pour l'inclinaison de  $0^\circ$  n'a pas mis en évidence d'interaction *Matériau x Distance cible* significative sur l'erreur spatiale,  $F(4, 60) = 0.646$ ,  $p = 0.632$ . Des tests post-hocs de Bonferroni ( $p < 0.05 / 9$ , soit 9 comparaisons par *Matériau*) comparant chaque moyenne à zéro ont été menés par inclinaison, ils sont représentés dans la Figure 4.1.6 par des étoiles quand ces comparaisons sont significatives.



**Figure 4.1.6 Interaction Matériau x Inclinaison x Distance cible pour l'erreur spatiale et la vitesse initiale du cube, (moyenne  $\pm$  erreur-type). Les comparaisons à 0% avec les post-hoc de Bonferroni significatives ( $p < 0.05$  / 9) sont illustrées par des étoiles.**

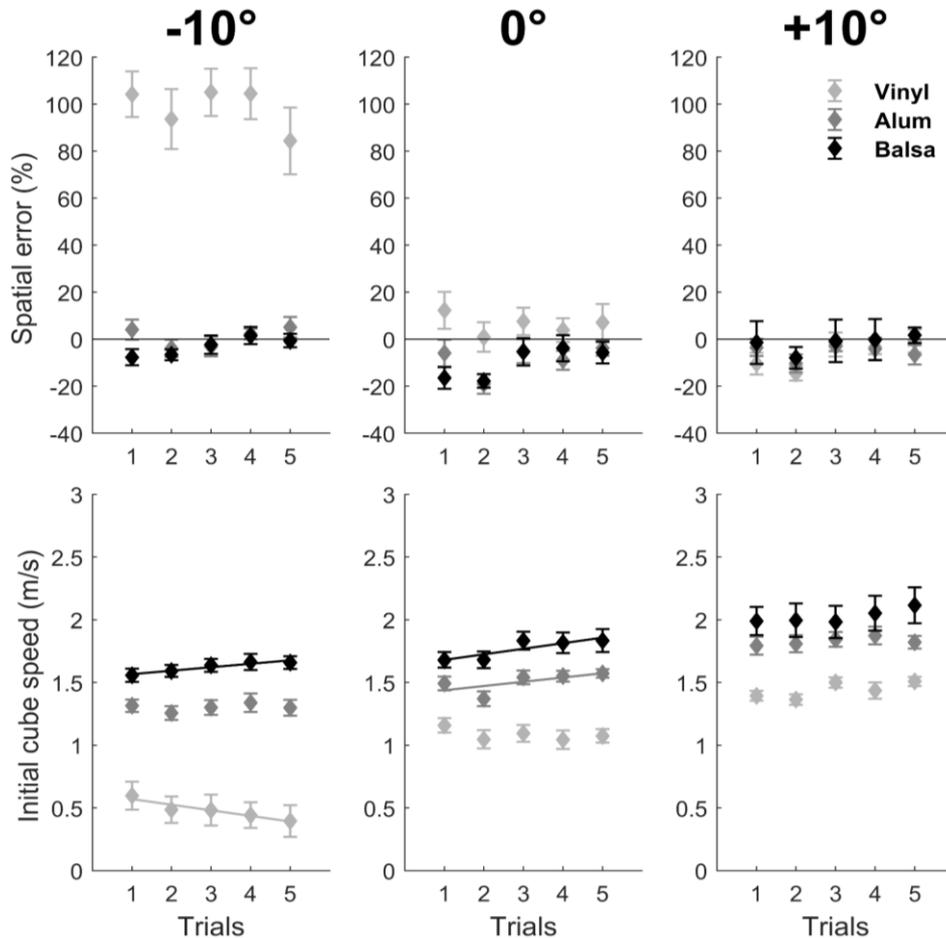
Essayons d'interpréter l'interaction *Matériau x Inclinaison x Distance cible* en nous intéressant d'abord à 0° qui est la condition par laquelle commencent les participants. Pour la distance cible de 20 cm, on remarque, qu'en moyenne, les participants sont relativement précis pour les trois surfaces mais, avec l'augmentation de la distance des cibles (40cm et 60cm), il se produit une légère sous-estimation de la friction pour les surfaces ayant un coefficient de frottement plus élevé (aluminium et balsa). A +10° pour 20 cm, on retrouve une performance correcte dès 20cm, ce qui suggère une généralisation du  $\mu$  *subjectif* pour une surface donnée. Toutefois, avec l'augmentation de la distance sur les surfaces en montée, les participants n'arrivent pas à atteindre la cible dans la condition la plus difficile (60 cm) pour chacune des trois surfaces, ce qui suggère que, soit les participants sous-estiment l'effet de l'inclinaison sur le déplacement du cube, soit ils arrivent à une limite motrice quant à la vitesse initiale à transmettre au cube. A -10°, cette hypothèse de limite du système moteur pour la distance cible la plus éloignée (60 cm) ne tient pas car la vitesse initiale du cube est bien en deçà de ce que les participants peuvent produire. En supposant que la gravité et l'inclinaison du support sont correctement perçues (cf.

section 3. *Problématique*), le problème est donc plutôt une difficulté de régulation du geste qui reflète, soit une surestimation de l'effet de l'inclinaison sur le déplacement du cube (ce qui invite à réduire la vitesse initiale du cube), soit une sous-estimation de la friction qui nécessiterait plus d'essais (que les 5 essais par condition) afin d'ajuster la valeur du  $\mu$  *subjectif* par rapport aux invariants physiques de la tâche et ainsi améliorer la paramétrisation du mouvement.

Toujours dans la condition  $-10^\circ$ , mais cette fois-ci pour la surface vinyle, on arrive à une limite de cette expérience qui se caractérise par une impossibilité des participants à réguler leur mouvement efficacement afin de réduire l'erreur spatiale du fait de la friction très faible du vinyle. La réduction de l'erreur spatiale pour le vinyle à  $-10^\circ$  n'est pas une conséquence de la régulation motrice, mais reflète simplement un artéfact du fait que l'erreur est exprimée en pourcentage de la distance cible, et donc pour une même erreur spatiale absolue maximum mesurable de 75 cm (où l'objet arrive en bout piste ; N.B. il y avait un obstacle qui fermait le bout de la piste pour empêcher que l'objet ne sorte de la gouttière), l'erreur exprimée en pourcentage va décroître avec l'augmentation de la distance cible. Effectivement, avec le vinyle à  $-10^\circ$  l'objet arrivait irrémédiablement en bout de piste. Cet effet sera notamment à prendre en considération dans les autres résultats de cette étude. Toutefois, on peut cependant observer que les participants tiennent compte de cette très faible friction car ils ne changent pas la vitesse initiale du cube entre 20cm et 40cm.

Les ANOVAs n'ont ensuite mis en évidence que deux autres interactions à trois facteurs et pas d'interaction entre les quatre facteurs d'intérêt (Annexe 7.3.). Les deux interactions suivantes n'étaient significatives que pour la vitesse initiale du cube, comme nous allons le voir maintenant. En effet, l'interaction *Matériau x Inclinaison x Essai*, illustrée dans la Figure 4.1.7, s'est avérée significative pour la vitesse initiale,  $F(16, 240) = 1.73, p = 0.04$ , mais pas pour l'erreur spatiale,  $F(16, 240) = 1.3, p = 0.35$ . Nous avons ensuite mené une sous-ANOVA sur la vitesse initiale du cube par *Inclinaison* afin de décomposer l'interaction *Matériau x Inclinaison x Essai*. Pour l'inclinaison de  $-10^\circ$ , l'interaction *Matériau x Essai* s'est avérée significative,  $F(8, 120) = 5.11, p < 0.0001$ . Une analyse tendance sur l'effet des essais a mis en évidence une tendance linéaire dans l'effet des essais, pour le balsa,  $F(1,15)=8.78, p = 0.0097$  et le vinyle,  $F(1,15)=36.49, p = 0.00002$ , mais pas pour l'aluminium,  $F(1,15)=0.21, p = 0.65$ . Pour l'inclinaison de  $0^\circ$ , l'interaction *Matériau x Essai* s'est avérée également significative,  $F(8, 120) = 2.29, p = 0.025$ . Une analyse tendance sur l'effet des essais a mis en évidence une tendance linéaire dans l'effet des essais, pour l'aluminium,  $F(1,15)=14.68, p =$

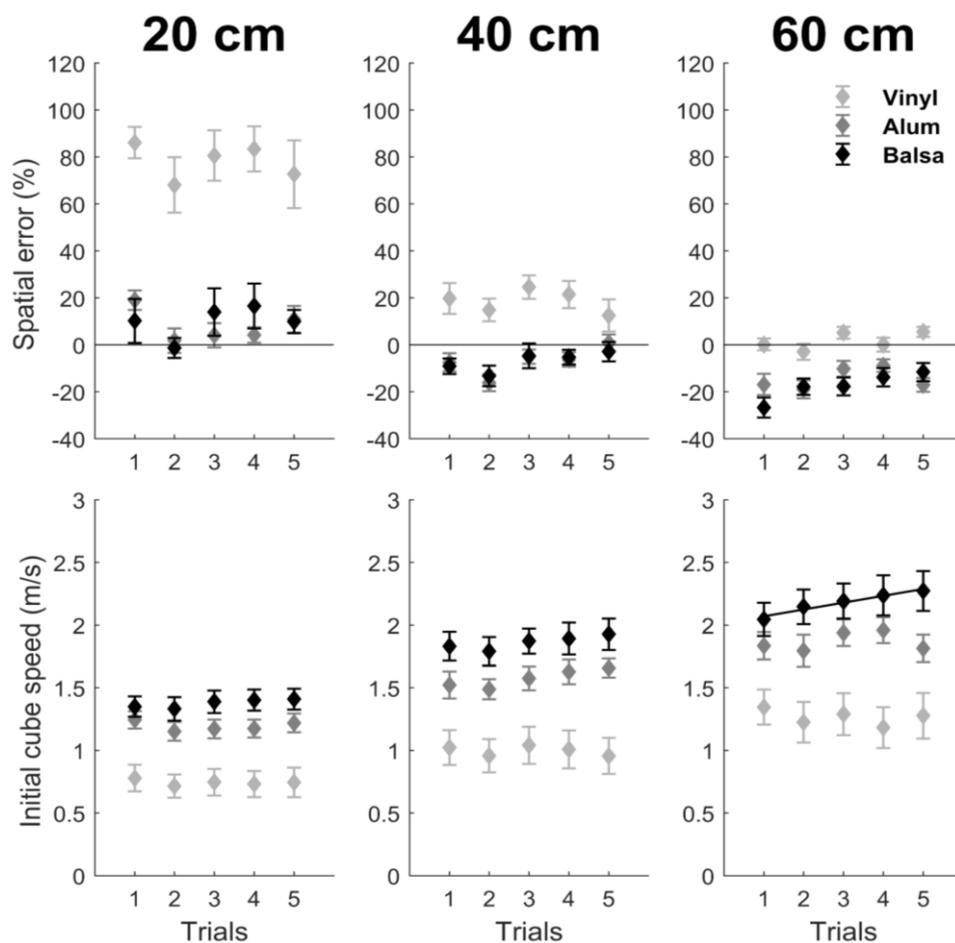
0.0016, pour le balsa,  $F(1,15)=5.17$ ,  $p = 0.038$ , mais pas pour le vinyle,  $F(1,15)=2.89$ ,  $p = 0.11$ . Enfin, pour l'inclinaison de  $+10^\circ$ , la dernière sous-ANOVA n'a pas montré d'interaction *Matériau x Essai* significative pour l'inclinaison de  $+10^\circ$ ,  $F(8, 120) = 1.04$ ,  $p = 0.41$ . Les tendances linéaires significatives sont illustrées dans la Figure 4.1.7.



**Figure 4.1.7** Effet d'interaction entre *Matériau x Inclinaison x Essai* pour l'erreur spatiale (en pourcentage de la distance cible) et la vitesse initiale du cube, (moyenne  $\pm$  erreur-type). Seules les régressions pour les analyses de tendance significatives sont illustrées. (NB: uniquement l'interaction sur la vitesse est significative)

En résumé, la Figure 4.1.7 suggère à  $0^\circ$  une reparamétrisation de la vitesse du cube pour les matériaux de surfaces aluminium et balsa, en vue d'améliorer la performance. Par contre, à  $+10^\circ$ , les participants ne semblent pas avoir besoin de reparamétrer le mouvement, ce qui permet de supposer une généralisation du  $\mu$  *subjectif* calibré dans la condition  $0^\circ$  vers celle à  $+10^\circ$ . Enfin, à  $-10^\circ$ , les participants doivent reparamétrer leur geste en augmentant la vitesse initiale du cube pour le balsa (sous-estimation de la friction) et en la diminuant pour le vinyle (pour empêcher l'objet d'arriver en bout de piste). Par contre, pour la surface intermédiaire, l'aluminium, les participants semblent avoir une performance optimale dès leur premier essai sur la base du  $\mu$  *subjectif* calibré à  $0^\circ$ .

Enfin, l'interaction *Matériau x Distance cible x Essai*, illustrée dans la Figure 4.1.8, s'est avérée significative pour la vitesse initiale,  $F(8, 120) = 1.818, p = 0.03$ , mais pas pour l'erreur spatiale,  $F(8, 120) = 0.93, p = 0.53$ . Nous avons ensuite mené des sous-ANOVAs sur la vitesse initiale du cube par distance cible afin de décomposer l'interaction *Matériau x Essai*. Ces ANOVAs ont montré une interaction *Matériau x Essai* significative pour la distance de 60 cm seulement,  $F(8,120) = 3.596, p < 0.001$ , et pas pour celle de 20 cm,  $F(8,120)=0.952, p = 0.477$ , ni pour celle de 40 cm,  $F(8,120) = 1.38, p = 0.212$ . Des analyses de tendances sur l'effet *Essai* pour l'interaction significative n'ont montré qu'une tendance linéaire significative pour le balsa,  $F(1, 15)=8.74, p = 0.01$ , comme illustré dans la Figure 4.1.8. Cette condition balsa pour une cible à 60 cm est la condition la plus exigeante d'un point de vue moteur, en termes de vitesse initiale à produire. En résumé, dans l'ensemble, lorsque l'on regarde la vitesse initiale du cube pour 20 cm, 40 cm et 60 cm (Figure 4.1.8), les participants ne semblent pas avoir besoin de reparamétrer leur geste pour le vinyle et l'aluminium. Par contre, ils doivent reparamétrer la vitesse initiale du cube à l'impact à 60 cm pour la surface qui a le coefficient de frottement le plus élevé, c'est-à-dire le balsa, et qui correspond à la condition la plus exigeante en termes de vitesse initiale à fournir.



*Figure 4.1.8 Effet d'interaction Matériau x Distance cible x Essai pour l'erreur spatiale (en pourcentage de la distance cible) et la vitesse initiale du cube, (moyenne  $\pm$  erreur-type). Seules les régressions pour les analyses de tendance significatives sont illustrées.*

#### **4.1.4 Discussion**

Notre première hypothèse (cf. section 4.1.1 *Problématiques et hypothèses*) était que les informations visuelles relatives à la texture du matériau de l'objet et de la surface ne permettent pas à elles seules de se représenter avec précision la friction. Nos données semblent valider cette Hypothèse 1, d'une part, parce que les participants font des erreurs à 0° quand ils découvrent les surfaces (Figure 4.1.6 pour 20 cm et 60 cm) et, d'autre part, parce qu'une adaptation du geste semble nécessaire au cours des essais à 0° (Figure 4.1.7 avec la vitesse initiale du cube qui augmente avec les essais pour l'aluminium et le balsa). Cette adaptation refléterait une calibration du  $\mu$  *subjectif*.

Notre deuxième hypothèse était que les participants se construisent une représentation de la friction au fur et à mesure des essais de la condition initiale correspondant à l'inclinaison 0°. Une fois ce  $\mu$  *subjectif* calibré, les participants seraient en capacité de généraliser la performance à d'autres inclinaisons sur la base du  $\mu$  *subjectif*. Les données illustrées dans la Figure 4.1.7 vont partiellement dans le sens de cette Hypothèse 2, qui semble confirmée uniquement pour l'aluminium qui ne donne pas lieu à une adaptation (tendance linéaire) de la vitesse initiale du cube dans les conditions -10° et +10°. A contrario, une adaptation semble nécessaire pour le balsa dans la condition -10°. Enfin, pour la surface en vinyle, l'absence d'adaptation au cours des essais pour +10° semble aller dans le sens de l'Hypothèse 2. Toutefois, on ne peut rien dire pour le vinyle à -10° pour les raisons évoquées dans la section précédente relativement à la faible friction qui amenait systématiquement l'objet en bout de piste (induisant des erreurs spatiales systématiques). Pour aller plus loin, il faudrait chercher à comprendre comment les participants, sur la base de leur modèle interne de la friction, régulent leur geste balistique de frappe, en analysant leur geste grâce à un dispositif de capture du mouvement.

## 4.2 Expérience 2 : Analyse du mouvement pour faire glisser un objet

### 4.2.1 Problématiques et hypothèses

Comme le suggère la littérature, notre expérience pilote (Expérience 1) vient conforter l'idée que l'être humain est capable de percevoir la friction lors d'interactions avec des objets et d'anticiper les conséquences cinématiques de la friction sur le mouvement de l'objet. Sur la base de cette expérience, nous avons tiré les conclusions nécessaires afin de proposer cette nouvelle étude qui est au cœur de la thèse. Grâce aux résultats présentés en Annexe (7.4.), nous avons retenu dans la présente Expérience 2, l'ordre de lancer du cube en fonction de la distance cible, à savoir de la plus proche vers la plus éloignée (Chauvel et al., 2012). Nous avons par ailleurs écarté la surface vinyle (PVC) car jugée trop glissante en descente et son aspect faux parquet pouvait créer des difficultés chez certains participants pour identifier avec précision le matériau de la surface. Nous avons également choisi d'augmenter le nombre d'essais de 5 à 10 pour mieux étudier l'adaptation motrice, dans le but de comprendre si les participants arrivent à adapter et à stabiliser leur performance vers un certain seuil optimum. Nous avons également décidé de ne présenter que deux distances cibles (25 cm et 50 cm). Au final, dans l'Expérience 2, les paramètres qui varient sont le matériau de la surface (aluminium ou balsa) sur laquelle l'objet glisse, la pente de la surface ( $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  ou  $+10^\circ$ ), la distance cible (25 cm ou 50 cm) et le nombre d'essais (dix répétitions). Comme dans l'expérience précédente, nous testons une **première hypothèse** selon laquelle les participants vont, dans un premier temps, calibrer leur modèle interne subjectif de la friction ( $\mu$  *subjectif*) dans la condition de référence  $0^\circ$  où ils découvrent une surface, puis vont généraliser ce  $\mu$  *subjectif* à d'autres conditions expérimentales ayant la même surface.

Dans cette nouvelle étude, nous sommes allés plus loin en cherchant à comprendre comment les participants, sur la base de leur modèle interne de la friction, régulent leur geste balistique de frappe grâce à un dispositif de capture du mouvement. Suite aux observations effectuées lors de l'expérience précédente, nous avons cherché à étudier la variabilité inter-individuelle dans le mouvement de frappe. En effet, au vu des contraintes liées à la tâche avec le coude en position fixe sur la table, il n'y a que la rotation de deux segments corporels (l'avant-bras et la main) qui peuvent générer suffisamment d'énergie pour faire glisser le cube vers la cible dans

les conditions les plus difficiles. Nous formulons ainsi une **deuxième hypothèse** selon laquelle il existe deux grands types de stratégies motrices, l'une mobilisant principalement la rotation de l'avant-bras et l'autre la rotation du poignet.

Pour que le cube s'arrête précisément au niveau de la cible, il faut transmettre au cube une valeur précise d'énergie cinétique. Nous supposons également (**hypothèse 3**) que les participants transmettent la même quantité d'énergie cinétique totale au cube quelle que soit leur stratégie motrice, mais que la valeur d'énergie cinétique associée aux segments corporels de l'avant-bras ou de la main est différente en fonction de la stratégie motrice utilisée. Par ailleurs, nous étudierons comment le contrôle de l'énergie cinétique varie en fonction des contraintes de la tâche.

Pour mieux comprendre le contrôle du geste de frappe nous avons étudié les déterminants cinématiques de la performance au moment de l'impact (tels que la vitesse du bout de l'index, l'angle de la trajectoire d'approche, l'orientation de la phalange à l'impact ainsi que l'écart entre le bout du doigt et le centre du cube). Enfin, le contrôle spatio-temporel du geste balistique a été également étudié en analysant la durée de frappe, l'amplitude de la frappe et la vitesse à l'impact. Notre dernière hypothèse (**hypothèse 4**) est que les participants vont majoritairement contrôler l'amplitude du geste en gardant relativement invariant le temps de mouvement pour contrôler la vitesse à l'impact.

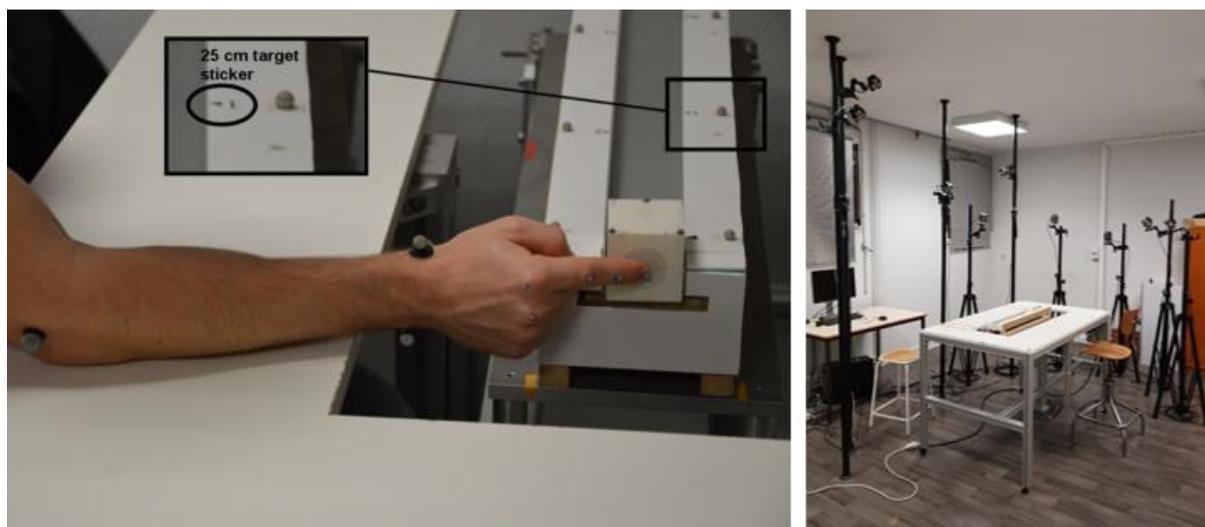
## **4.2.2 Matériel et méthode**

### **4.2.2.1 Participants**

Trente-trois personnes ont participé à cette expérience (22 hommes et 11 femmes), d'âge moyen de 25 ans (écart-type = 5). Tous les sujets étaient droitiers (test d'Édimbourg, Oldfield 1971), ils avaient une vision normale ou corrigée et aucune blessure physique ou pathologie pouvant affecter le mouvement des mains n'a été rapportée. L'expérience a été approuvée par le comité d'éthique local (CER-Paris-Saclay-2018-021-R). Après avoir lu les instructions, les participants ont signé un formulaire de consentement et ont rempli le questionnaire d'Édimbourg.

### 4.2.2.2 Configuration expérimentale

Pendant l'expérience, les participants devaient frapper avec le bout de leur index un objet afin de le faire glisser vers une distance cible. L'objet était un parallélépipède rectangle (longueur = 60 mm, largeur et hauteur = 50 mm), imprimé en PLA (acide polylactique), d'une masse de 46 g. Une cible circulaire sur la face arrière de l'objet indiquait où frapper l'objet avec le bout de l'index pour l'envoyer à une distance cible (voir Figure 4.2.1). Par souci de simplicité, cet objet est appelé "cube" dans la suite du document.



**Figure 4.2.1. Configuration expérimentale et tâche.** A gauche : les participants devaient frapper un cube pour le faire glisser vers l'une des deux distances cibles indiquées par un autocollant triangulaire (accompagné d'un marqueur réfléchissant pour la capture de mouvement) placé sur le côté supérieur droit d'une gouttière. Le bras est ici en position initiale perpendiculaire au dispositif expérimental en gouttière et le bout de l'index au centre de la face arrière du cube, dans la condition de pente de  $0^\circ$ , le matériau de la surface est en aluminium. Des marqueurs réfléchissants ont été placés sur le dispositif, le cube et le membre supérieur droit du participant, afin d'analyser le mouvement. A droite : illustration des 9 caméras (pour la capture mouvement) positionnées autour de la table motorisée supportant le dispositif expérimental.

Au début de chaque essai, le cube était positionné à l'entrée d'une gouttière de section carrée permettant au cube de glisser le long d'un seul axe de translation tout en minimisant les rotations latérales (Figure 4.2.1.). Les dimensions intérieures de la gouttière étaient les suivantes : longueur = 800 mm, largeur = 55 mm et hauteur = 25 mm. Les bords latéraux de la gouttière étaient en aluminium. Par contre, le matériau de la surface de glissement inférieure était soit du balsa, soit de l'aluminium, selon les conditions.

Les participants avaient pour instruction de frapper le cube afin qu'il atteigne en glissant l'une des deux distances cibles : 25 cm ou 50 cm, indiquées par un autocollant positionné sur le côté supérieur droit de la gouttière. Le dispositif en gouttière était fixé sur une table motorisée permettant à l'expérimentateur de faire varier l'inclinaison de la surface ( $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $+10^\circ$ ) et de régler la hauteur du dispositif afin de s'assurer que la position de départ du bout de l'index se trouvait en face de la cible placée sur le cube (voir Figure 4.2.1.).

### **4.2.2.3 Acquisition des données**

Pendant l'expérience, les mouvements du bras et du cube ont été enregistrés à 250 Hz par un système de capture de mouvement OptiTrack comportant neuf caméras (modèle S250e). Des marqueurs réfléchissants ont été placés sur le dispositif expérimental, le cube et le membre supérieur droit. Comme l'illustre la Figure 4.2.1, des marqueurs de 4 mm ont été placés sur la tête de la phalange de l'index et sur la tête des second et troisième métacarpiens, en accord avec le placement de Zhang et al. (2003). Des marqueurs de différentes tailles ont été placés sur le dos de la main, le poignet et le coude en suivant les recommandations de l'International Society for Biomechanics (ISB) Wu et al. (2005). Pour le poignet, des marqueurs réfléchissants de 11 mm ont été placés sur les processus styloïdes du radius et du cubitus. Pour le coude, des marqueurs réfléchissants de 14 mm ont été placés sur les épicondyles latéral et médial. Enfin, un groupe de trois marqueurs réfléchissants de 4 mm a été placé sur le cube, et des marqueurs réfléchissants de 7 mm ont été mis sur le dispositif pour définir la position initiale du cube ainsi que les distances cibles (25 cm et 50 cm).

### **4.2.2.4 Tâche expérimentale**

Avant le début de l'expérience, durant une phase de calibration, les participants ont tendu leur bras afin de pouvoir mesurer la longueur de l'avant-bras ( $L_{\text{Avant-Bras}}$ ) et la longueur de la main ( $L_{\text{Main}}$ ). La taille et le poids de chaque participant ont également été recueillis. Ensuite, avant chaque essai, les participants ont placé leur coude à une position standard indiquée par un autocollant sur la table pour leur permettre de faire pivoter leur avant-bras tout en gardant leur coude sur la table. Il a été également demandé aux participants de garder leur avant-bras de façon plus ou moins perpendiculaire par rapport au dispositif, avec la phalange distale de leur index positionnée au milieu de la cible placée sur la face arrière du cube (voir Figure 4.2.1.). Les participants étaient assis sur une chaise dont la hauteur a été ajustée pour que leur coude repose sur la table afin que le bras et l'avant-bras soient à peu près perpendiculaires l'un par

rapport à l'autre. Lors du mouvement de frappe, les participants étaient libres d'adopter la coordination motrice qu'ils souhaitaient tant que le coude restait à la même position sur la table. Le but de la tâche était de frapper le cube pour qu'il glisse le long de la gouttière afin que l'arête avant du cube stoppe à la distance cible indiquée par un autocollant triangulaire et un marqueur réfléchissant placés sur la gouttière (voir Figure 4.2.1.). Après chaque lancer, l'expérimentateur remettait le cube à sa position initiale indiquée par des autocollants triangulaires et des marqueurs réfléchissants. Le cube reposait sur 5 cm de la surface et 1 cm dépassait de la gouttière pour éviter toute collision entre la main et le dispositif.

Il y avait 12 conditions résultant de la combinaison des deux distances cibles (25 cm et 50 cm), des deux matériaux de surface (balsa et aluminium) et de trois inclinaisons de surface (-10°, 0° et +10°). Au total, les participants ont effectué 120 essais avec dix répétitions par condition. Tous les essais étaient organisés sous la forme de blocs d'essais pour chacune des conditions. L'enchaînement des inclinaisons s'effectuait de la façon suivante : chaque session expérimentale commençait toujours à la condition 0°, suivie soit de l'inclinaison -10° puis de l'inclinaison +10° (groupe d'ordre de blocs "0°, -10°, +10°"), soit de l'inclinaison +10° puis de l'inclinaison -10° (groupe d'ordre de blocs "0°, +10°, -10°"). Ces trois blocs d'essais avaient lieu soit sur la surface en balsa, suivis de trois blocs d'essais sur la surface en aluminium, ou vice versa, l'ordre étant contrebalancé entre les participants. Enfin, toutes ces conditions (60 essais) ont été exécutées en un bloc d'essais pour la distance cible de 25 cm, suivi d'un bloc pour la distance cible de 50 cm (60 essais). Ces différents ordres d'enchaînement de blocs ont constitué quatre groupes, comme l'illustre le Tableau 4.2.1.

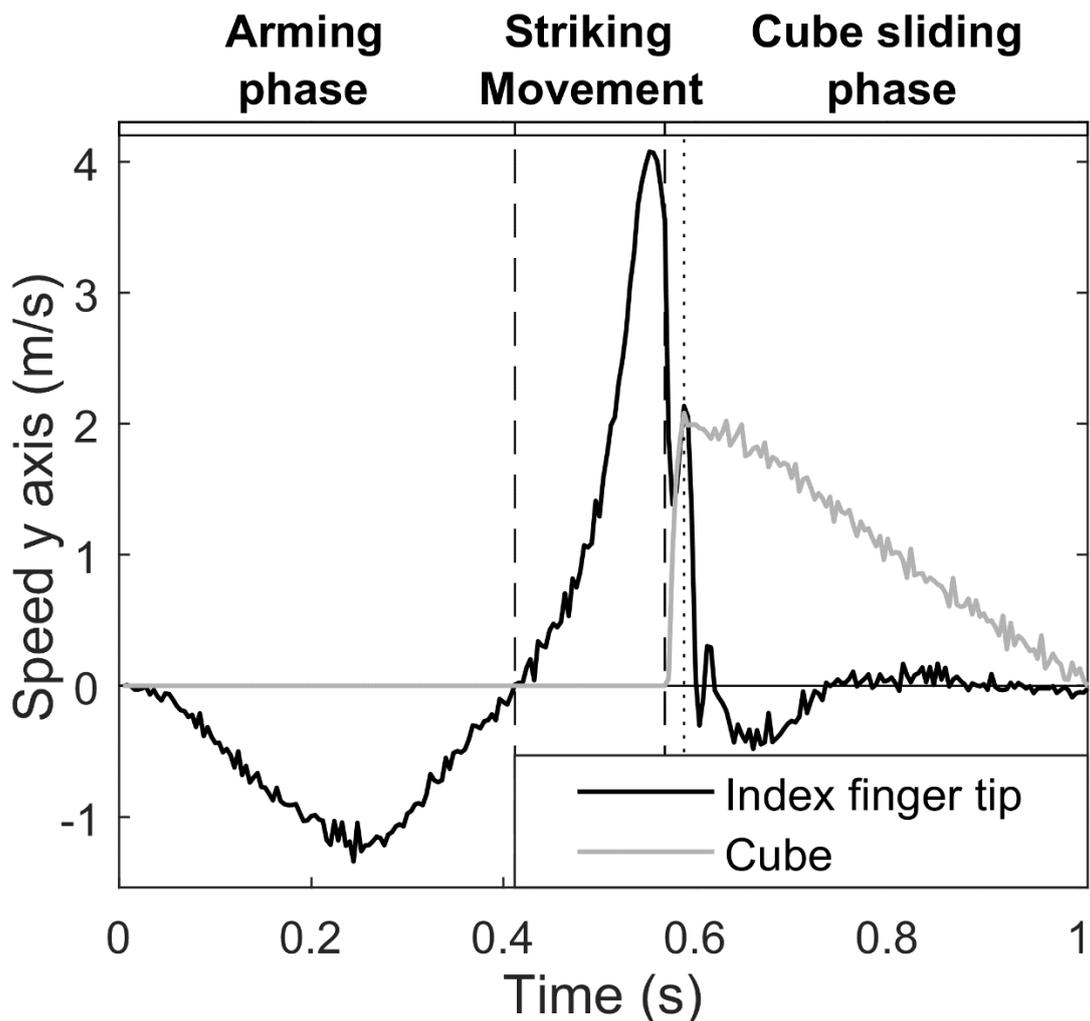
| A              | Groupe d'ordre des blocs: 0°, -10°, +10° |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Distance cible | 25 cm                                    |       |       |       |       |       | 50 cm |       |       |       |       |       |
|                | 0°                                       | -10°  | +10°  | 0°    | -10°  | +10°  | 0°    | -10°  | +10°  | 0°    | -10°  | +10°  |
| Numéro du bloc | 1  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| Groupe 1       | Alu                                      | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa |
| Groupe 2       | Balsa                                    | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   |

| <b>B</b>              | <b>Groupe d'ordre des blocs: 0°, +10°, -10°</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Distance</b>       | 25 cm   |       |       |       |       |       | 50 cm |       |       |       |       |       |
| <b>cible</b>          |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| <b>Inclinaison</b>    | 0°  | +10°  | -10°  | 0°    | +10°  | -10°  | 0°    | +10°  | -10°  | 0°    | +10°  | -10°  |
| <b>Numéro du bloc</b> | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| <b>Groupe 3</b>       | Alu   | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa |
| <b>Groupe 4</b>       | Balsa   | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   | Balsa | Balsa | Balsa | Alu   | Alu   | Alu   |

*Tableau 4.2.1. Description de l'ordre des blocs utilisé dans l'Expérience dans chaque groupe, qu'il s'agisse A) du groupe d'ordre des blocs "0°, -10°, +10°", ou B) du groupe d'ordre des blocs "0°, +10°, -10°". Chaque groupe d'ordre de blocs a été subdivisé en deux sous-groupes : l'un commençant par l'aluminium (alu) suivi du bois de balsa (balsa), et l'autre dans l'ordre inverse.*

#### **4.2.2.5 Analyse des données**

La capture de mouvement a été enregistrée à l'aide du logiciel AMASS et les données ont été traitées avec un code spécialement écrit sur MATLAB (disponible en Science Ouverte à partir du doi: [10.5281/zenodo.5705206](https://doi.org/10.5281/zenodo.5705206)) pour générer les fichiers nécessaires à l'exécution de statistiques à l'aide de STATISTICA, JASP et SPSS. Aucun filtre passe-bas n'a été appliqué sur la position des marqueurs dans l'espace 3D car, si les paramètres de filtrage couramment utilisés dans la littérature sur le mouvement humain avaient été appliqués (par exemple, coupure de 10-15 Hz, Butterworth de deuxième ou troisième ordre), le phénomène de collision (d'une durée d'environ 15 ms) aurait été considéré comme du bruit et donc filtré.



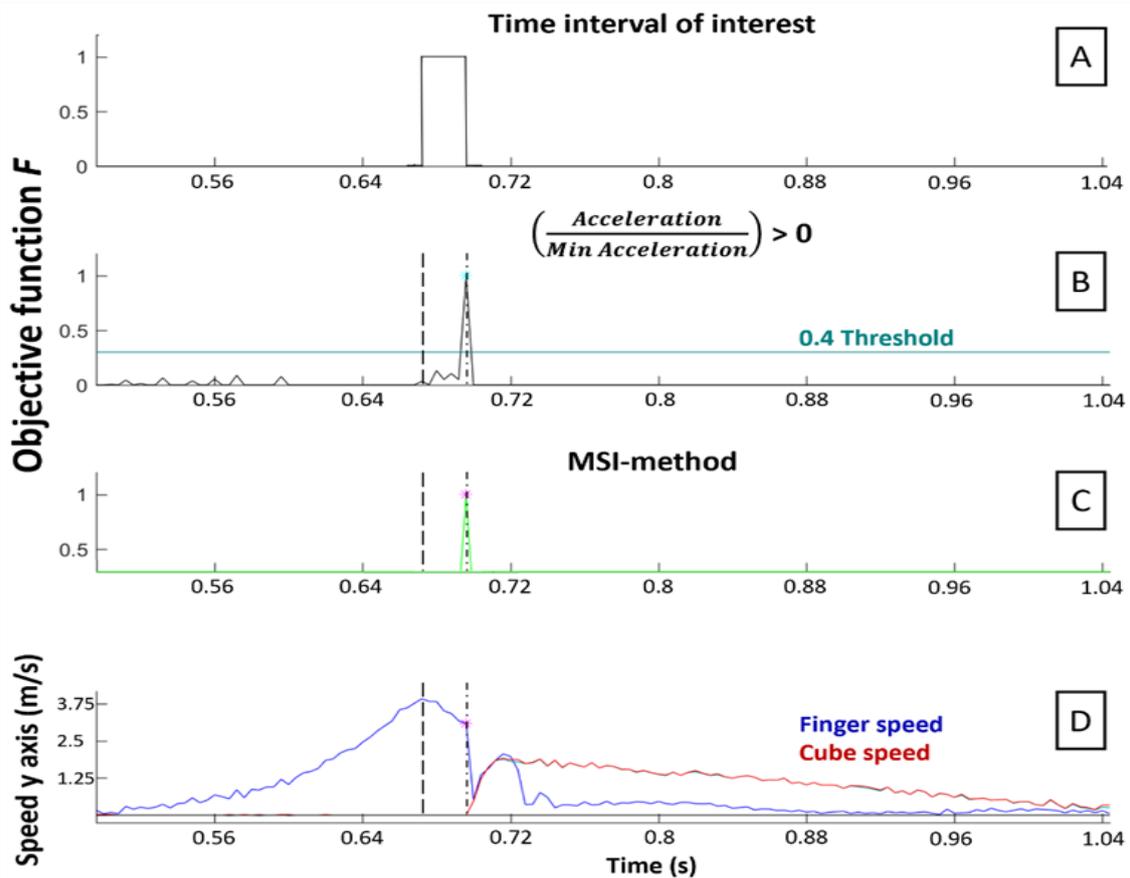
**Figure 4.2.2. Segmentation du geste balistique et du mouvement du cube.** Le mouvement est segmenté en trois phases en prenant en considération la vitesse du bout de l'index et du cube le long de l'axe principal du dispositif expérimental (la gouttière). La phase d'armement (arming phase) commence lorsque les participants éloignent le bout de leur index du cube et se termine lorsque le bras s'arrête à son extension maximale avec une vitesse égale à zéro. Pendant la phase du mouvement de frappe (striking movement), le bout de l'index se déplace vers le cube avec une vitesse croissante jusqu'à l'impact. Le début de la phase de glissement du cube (cube sliding phase) correspond à la durée du contact initial entre l'index et le cube correspondant à un changement de vitesse mutuelle reflétant le transfert d'énergie du doigt vers le cube qui commençait à glisser jusqu'à s'arrêter.

Nous avons segmenté le mouvement du bras en trois phases sur la base de la cinématique du bout de l'index et du cube, comme illustré dans la Figure 4.2.2., la vitesse étant mesurée le long de l'axe y qui correspond à l'axe de la gouttière. La vitesse du bout de l'index était positive pour un mouvement vers le cube et négative pour un mouvement s'éloignant du cube. La phase d'armement commençait lorsque les participants éloignaient le bout de l'index du cube et se terminait lorsque le bras s'arrêtait à son extension maximale avec une vitesse égale à zéro. Pendant le mouvement de frappe, la main se déplaçait vers le cube avec une vitesse croissante

jusqu'à l'impact. Le début de la phase de glissement du cube (voir Figure 4.2.2.) correspondait au début du temps de contact initial entre l'index et le cube ( $t_{\text{contact}}$ ). Il a été déterminé par la méthode des sources d'informations multiples (méthode MSI, Schot et al., 2010; Smeets et al., 2010) en utilisant le pic de décélération du bout du doigt (dû à la collision) pour l'intervalle de temps entre la vitesse maximale du bout du doigt ( $t_{\text{maxFS}}$ ) et la vitesse minimale du cube ( $t_{\text{minCS}}$ ) juste avant que le cube ne commence à bouger (Figure 4.2.3.A). Le début du mouvement du cube a été défini comme étant le moment où la vitesse du cube est supérieure à 0,04 m/s. Par conséquent, le moment du contact ( $t_{\text{contact}}$ ) est déterminé dans l'intervalle [ $t_{\text{maxFS}}$  ;  $t_{\text{minCS}}$ ], par l'Équation ci-dessous :

$$t_{\text{contact}} = \min \left\{ t \left( \frac{\text{Acceleration}}{\text{Min Acceleration}} \right) > 0.4 \right\} - dt \quad \text{Équation 4.2.1.}$$

Chaque valeur d'accélération du bout du doigt pendant l'intervalle de temps (délimité par les crochets dans l'Équation 4.2.1.) a été normalisée en divisant chaque valeur par la valeur d'accélération minimale observée dans l'intervalle (Figure 4.2.3.B). Lorsque la décélération du bout du doigt était supérieure à 40% (cf. la valeur 0,4 dans l'Équation 4.2.1.), le point temporel immédiatement précédent (c'est-à-dire  $dt$  dans l'Équation 4.2.1.) était considéré comme le moment initial du contact (Figure 4.2.3.C). Nous avons utilisé ce critère afin d'éviter une fausse détection du contact doigt-cube car après la vitesse maximale du doigt (début de l'intervalle de temps d'intérêt), il y avait parfois une légère décélération (moins de 40%) du mouvement du doigt avant le contact (voir Figure 4.2.3.B&D).



**Figure 4.2.3. Illustration du fonctionnement de la méthode des sources d'informations multiples pour trouver le moment du contact.** Le graphique A « Time interval of interest » illustre la fenêtre temporelle entre le temps de vitesse maximale du bout de l'index ( $t_{maxfs}$ ) et le temps de vitesse minimale du cube ( $t_{mincs}$ ) juste avant que le cube ne commence à bouger. Le graphique B illustre la normalisation de la décélération du mouvement de l'index avec le seuil minimum de détection du contact fixé 0.4. Le graphique C (MSI-method) montre la multiplication des fonctions objectives des graphiques A et B, permettant d'identifier le temps de contact (étoile magenta). Le graphique D illustre la vitesse du bout de l'index (bleu) et du cube (rouge), avec l'étoile violette qui correspond au dernier point de mesure temporel avant contact.

Au début de la phase où le cube se met à glisser, il y a une courte période où la pulpe de l'index est en contact avec la face arrière du cube, il s'opère alors un changement de vitesse concomitant, reflétant le transfert d'énergie du doigt vers le cube qui se met alors à glisser. Cette courte période est délimitée dans la Figure 4.2.2. par des lignes verticales en tirets et en pointillés dans le panneau de la phase de glissement du cube. A partir de la fin du contact, le cube glisse et sa vitesse décroît linéairement sous l'effet de la friction jusqu'à s'arrêter. La cinématique de décélération du cube a été utilisée pour déterminer le coefficient de friction cinétique ( $\mu_C$ ) et la vitesse optimale du cube afin d'atteindre la distance cible dans chaque condition.  $\mu_{ka}$  a été calculé à partir de l'Équation 2.3.3 suivante :

$$\mu_c = \frac{\left(\frac{dec}{-g}\right) - \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Équation 2.3.3

Pour estimer  $\mu_K$ , nous avons dû estimer la décélération ( $a = dec$ ) du cube en fonction de la gravité ( $g$ ) et de la pente de la surface ( $\alpha$ ). Pour ce faire, nous avons ajusté une fonction polynomiale du second ordre à la position du cube sur la période de glissement de l'objet sans impulsion (c'est-à-dire de la vitesse maximale du cube jusqu'à son arrêt), avec  $y = Ax^2 + Bx + C$ . Ensuite, la décélération du cube  $dec$  a été calculée à partir de la dérivée seconde,  $dec = y'' = 2A$ . Cette valeur  $\mu_c$  a été déterminée pour chaque essai expérimental. Dans cette étude,  $\mu_c$  prend en compte les deux sources de frottements qui entraînent la décélération du cube : le matériau de surface et les côtés en aluminium de la gouttière. Afin de prouver que les deux matériaux de surface (aluminium et balsa) ont des coefficients de friction cinétique différents, ce qui entraînerait une modulation du comportement lors de la frappe, nous avons calculé le  $\mu_c$  moyen pour chaque matériau de surface en contact avec le cube, pour chaque participant. Un test  $t$  apparié a révélé un  $\mu_c$  significativement plus élevé pour la surface en balsa ( $M = 0,47$ ,  $SE = 0,01$ ) par rapport à la surface en aluminium ( $M = 0,37$ ,  $SE = 0,01$ ),  $t(32) = 16,99$ ,  $p < 0,05$ .

Ensuite, nous avons estimé la vitesse optimale du cube ( $\text{Cube Speed}_{\text{optimal}}$ ) pour faire glisser l'objet jusqu'à la distance cible  $d$  pour chaque condition expérimentale, en utilisant :

$$\text{Cube Speed}_{\text{optimal}} = \sqrt{2 g d [\sin(\alpha) + \mu_c \cos(\alpha)]}$$

Équation 4.2.2.

Ces valeurs de vitesses optimales du cube sont résumées dans le Tableau 4.2.2 pour chaque condition expérimentale classée dans l'ordre croissant de contraintes pour effectuer la tâche.

|                           |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Target distance</b>    | 25    | 25    | 25    | 50    | 25    | 25    | 50    | 25    | 50    | 50    | 50    | 50    |
| <b>Surface slope</b>      | -10°  | -10°  | 0°    | -10°  | 0°    | +10°  | -10°  | +10°  | 0°    | 0°    | +10°  | +10°  |
| <b>Surface material</b>   | Alu   | Balsa | Alu   | Alu   | Balsa | Alu   | Balsa | Balsa | Alu   | Balsa | Alu   | Balsa |
| <b>Optimal cube speed</b> | 0.967 | 1.191 | 1.347 | 1.368 | 1.518 | 1.625 | 1.684 | 1.767 | 1.905 | 2.147 | 2.297 | 2.499 |

**Tableau 4.2.2.** Vitesse optimale moyenne du cube (m/s) pour chaque condition expérimentale classée en fonction des contraintes croissantes pour réaliser la tâche.

## 4.2.3 Résultats

### 4.2.3.1 Performance moyenne

L'erreur spatiale (%) et la vitesse initiale du cube (m/s) ont été utilisées comme variables de performance. L'erreur spatiale a été définie comme la différence entre la distance cible et la position finale de l'arête avant du cube, exprimée en pourcentage de la distance cible, avec des valeurs positives lorsque le cube s'arrête au-delà de la cible et des valeurs négatives quand le cube s'arrête avant la cible. L'adaptation motrice a été étudiée en ajustant une courbe exponentielle en fonction du facteur essai (trial) pour les deux variables de performance, à partir de l'Équation suivante :

$$\text{Performance} = \text{offset} + \text{constant} * \exp(-(\text{trial}-1)/\text{tau}) \quad \text{Équation 4.2.3.}$$

L'*offset* permet de quantifier la performance finale après le processus d'adaptation. *Constant* permet de quantifier l'intensité et la direction de la variation des performances. *Tau* quantifie la demi-vie de la décroissance exponentielle, en termes de nombre d'essais. Seuls les ajustements exponentiels avec un  $R^2 > 0.75$  ont été considérés comme reflétant une adaptation significative et ont été affichés dans les figures pour la performance moyenne et l'adaptation motrice.

Afin de vérifier s'il existait des erreurs spatiales systématiques au premier essai de chaque condition qui se réduiraient au cours des essais suivants, nous avons d'abord effectué une ANOVA sur l'erreur spatiale lors de l'essai 1 pour les interactions significatives impliquant les facteurs *Essai* et *Matériau de surface*. Ensuite, nous avons comparé l'erreur spatiale moyenne à 0%, pour le premier et le dernier essai, de manière à vérifier si l'adaptation motrice permettait de converger vers une performance optimale. Nous avons donc utilisé des tests *t* corrigés par Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/6 = 0.008$  (voir Figure 4.2.4) ou  $\alpha = 0.05/4 = 0.0125$  (voir Figure 4.2.5), en fonction du nombre d'essais initiaux et finaux pour un matériau de surface donné, illustré par un astérisque lorsqu'il est significatif.

**Le raisonnement est le suivant :** si les participants atteignent une performance optimale à la fin d'un bloc (erreur spatiale non significativement différente de 0%), cela signifie qu'au cours des essais les participants convergent vers une valeur correcte de la friction au sein d'un bloc. Par conséquent, nous avons supposé que malgré un changement de condition, les participants devaient être en mesure de paramétrer leurs mouvements de manière appropriée, dans le cadre

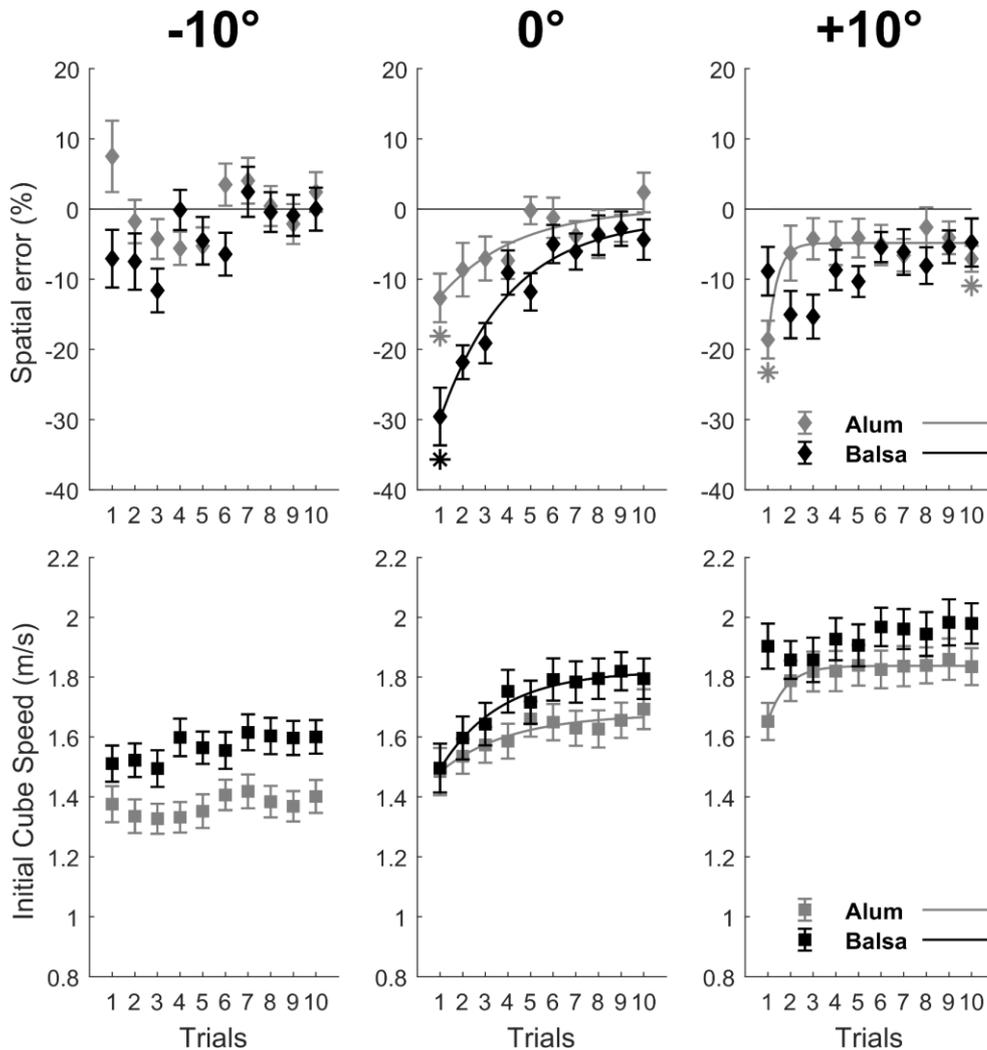
d'un changement d'inclinaison et/ou de distance de la cible, pour atteindre une performance optimale dès le premier essai de la nouvelle condition. Si ce n'était pas le cas, nous devrions alors nous attendre à des signes d'adaptation motrice au cours des essais de la nouvelle condition suggérant qu'une recalibration de la valeur du  $\mu$  *subjectif* était nécessaire pour réaliser les essais suivants. Par ailleurs, une vitesse d'apprentissage plus grande dans le nouveau bloc serait un autre argument en faveur d'une généralisation du modèle interne de la physique (en particulier pour le  $\mu$  *subjectif*) lors du passage d'un bloc à l'autre.

Dans cette étude, nous avons supposé que les participants avaient un modèle interne de la gravité relativement précis et une perception assez précise de l'inclinaison de la surface. Par conséquent, si les participants ont un modèle interne de la physique "suffisamment bon", ils ajusteront la vitesse initiale impulsée au cube de façon à obtenir une erreur spatiale minimale. L'erreur spatiale devrait donc directement refléter le modèle interne de la friction  $\mu$  des participants ( $\mu$  *subjectif*). Un  $\mu$  *subjectif* cohérent avec le  $\mu$  physique ne conduirait à aucune erreur spatiale si les participants étaient capables de réguler leur mouvement pour transmettre la vitesse initiale appropriée au cube. Nous faisons l'hypothèse que ce  $\mu$  *subjectif* est calibré au cours des essais de la première condition où les participants découvrent la surface testée dans les conditions expérimentales. Cette calibration devrait se refléter dans une décroissance exponentielle de l'erreur spatiale au cours des essais (courbe d'adaptation motrice). Aussi, nous avons étudié l'adaptation motrice en examinant comment l'effet *Essai* varie en fonction des autres facteurs expérimentaux. En conséquence, bien que ces derniers aient montré des effets principaux sur la performance ( $p < 0.001$ , cf tableaux d'ANOVA en Annexe 7.5.), nous avons concentré notre analyse sur les interactions impliquant le facteur *Essai*. Des ANOVA à mesures répétées sur les variables de performance ont été réalisées avec les facteurs intra-sujets suivants : *Distance cible* (25 cm et 50 cm) x *Matériau de la surface* (balsa et aluminium) x *Inclinaison de la surface* (-10°, 0° et +10°) x *Essai* (n=10).

L'interaction à quatre facteurs entre *Matériau de surface*, *Inclinaison*, *Distance cible* et *Essai* n'était pas significative, ni pour l'erreur spatiale,  $F(18, 576) = 0.44$ ,  $p = 0.98$ , ni pour la vitesse initiale du cube,  $F(18, 576) = 0.48$ ,  $p = 0.97$ . Cependant, nous avons trouvé une interaction à trois facteurs significative entre *Matériau*, *Inclinaison* et *Essai* pour l'erreur spatiale,  $F(18, 576) = 2.36$ ,  $p = 0.0013$  et pour la vitesse initiale du cube,  $F(18, 576) = 2.19$ ,  $p = 0.003$ , comme l'illustre la Figure 4.2.4. Nous avons d'abord voulu vérifier s'il y avait des erreurs spatiales systématiques lors du premier essai de chaque condition. Pour cela, nous avons effectué une

ANOVA sur l'erreur spatiale pour l'essai 1 avec *Matériau* et *Inclinaison* comme facteurs intra-sujet. Elle a montré que l'erreur spatiale variait significativement en fonction du matériau ( $M_{\text{alu}} = -7.92\%$ ,  $M_{\text{balsa}} = -15.16\%$ ),  $F(1, 32) = 6.14$ ,  $p = 0.019$ , et de l'inclinaison ( $M_{-10^\circ} = 0.23\%$ ,  $M_{0^\circ} = -21.11\%$ ,  $M_{+10^\circ} = -13.73\%$ ),  $F(2, 64) = 15.23$ ,  $p < 0.001$ . Enfin, il y a une interaction significative entre le *Matériau* et *Inclinaison*,  $F(2, 64) = 12.60$ ,  $p < 0.001$ . Les tests  $t$  corrigés par Bonferroni (avec  $\alpha = 0.05/6$ ) ont mis en évidence que cette erreur spatiale initiale différait significativement de 0% pour les deux matériaux dans la condition  $0^\circ$  (Alu :  $t(32) = 3.66$ ,  $p = 0.0009$  ; Balsa :  $t(32) = 7.18$ ,  $p < 0.001$ ) et pour l'aluminium dans la condition  $+10^\circ$  ( $t(32) = 6.92$ ,  $p < 0.001$ ), comme indiqué par les astérisques dans la Figure 4.2.4. Il est intéressant de noter que l'erreur spatiale est significativement plus importante pour le balsa ( $M = -29.57\%$ ) que pour l'aluminium ( $M = -12.66\%$ ),  $t(32) = 3.40$ ,  $p = 0.002$ , dans la condition de l'inclinaison de  $0^\circ$ . Cette différence au premier essai est due à une vitesse initiale similaire du cube,  $t(32) = 0.26$ ,  $p = 0.80$ , qui produit une erreur différente en raison des différents coefficients de friction. Étant donné que les participants commençaient toujours l'expérience avec la condition  $0^\circ$  pour un matériau et une distance cible donnés, le fait de garder une vitesse du cube similaire pour les deux surfaces pourrait faciliter l'estimation de  $\mu$  (sur la base des conséquences visuelles de la cinématique du cube) et aider à paramétrer ultérieurement le mouvement afin de réduire l'erreur spatiale lors des essais suivants.

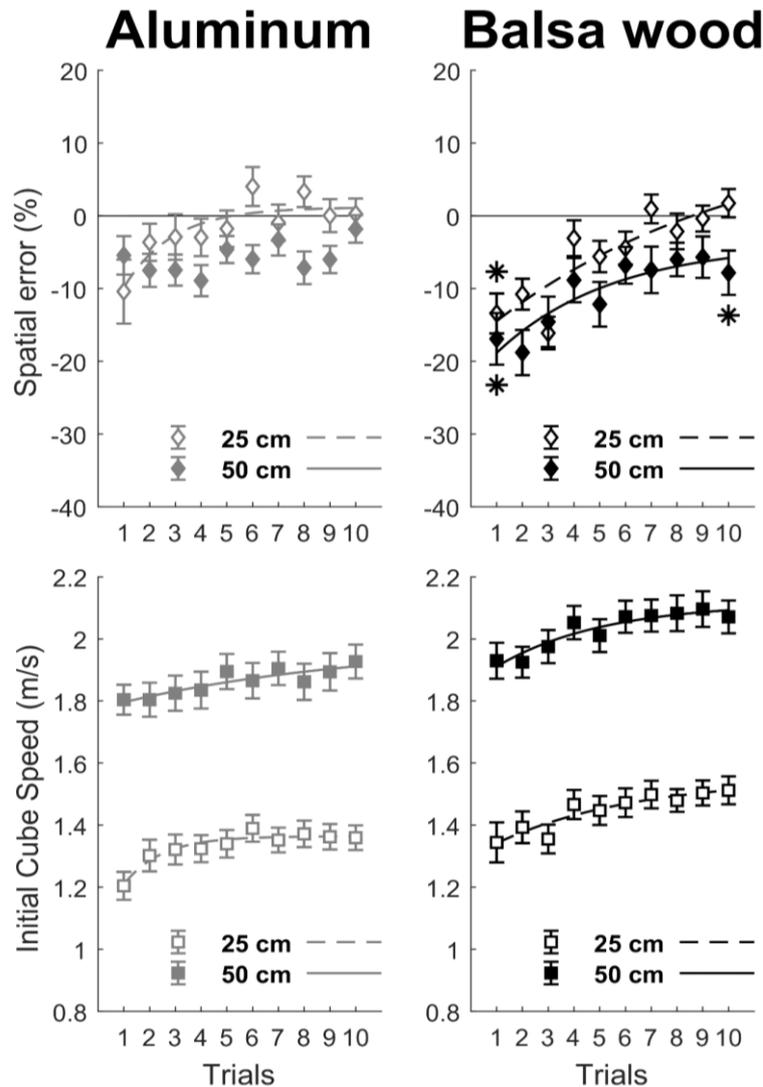
La paramétrisation du mouvement est illustrée par les courbes exponentielles significatives ( $R^2 > 0.75$ ) pour l'erreur spatiale ou la vitesse initiale du cube dans la Figure 4.2.4, par condition d'Inclinaison ( $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  et  $+10^\circ$ ), où un astérisque signale quand l'erreur spatiale à l'essai 1 différait significativement de 0%. Par ailleurs, l'absence d'ajustement exponentiel malgré une variabilité de la performance au cours des essais peut refléter une stratégie exploratoire durant laquelle les sujets tentent différentes façons de frapper l'objet jusqu'à ce qu'ils trouvent celle qui fonctionne le mieux. Ceci semble être le cas dans la condition  $-10^\circ$  pour les deux matériaux, et dans la condition  $+10^\circ$  pour le balsa. Enfin, nous avons voulu vérifier si pour l'erreur spatiale la performance est optimale lors du dernier essai de chaque condition de l'interaction entre *Matériau* et *Inclinaison*. Les tests  $t$  corrigés par Bonferroni (avec  $\alpha = 0.05/6$ ) ont montré que l'erreur spatiale à l'essai 10 différait significativement de 0% uniquement pour l'aluminium dans la condition  $+10^\circ$  ( $M = -7.08\%$ ),  $t(32) = 3.82$ ,  $p = 0.0006$ . Comme nous le montrerons dans des analyses ultérieures prenant en compte les groupes d'ordre de blocs, cette performance finale sous-optimale était due à la distance cible à 50 cm dans le groupe d'ordre de bloc " $0^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $-10^\circ$ ".



**Figure 4.2.4. Performance et adaptation motrice en fonction du Matériau de la surface et de l'Inclinaison, (moyenne  $\pm$  erreur-type). Les panneaux supérieurs montrent l'adaptation motrice uniquement dans la condition  $0^\circ$  et  $+10^\circ$  pour l'erreur spatiale (en pourcentage de la distance cible), et en fonction de la variation de la vitesse initiale du cube illustrée dans les panneaux inférieurs. Les ajustements exponentiels avec  $R^2 > 0.75$  illustrent l'adaptation motrice entre les essais. Les astérisques pour l'erreur spatiale indiquent que les moyennes initiales et finales diffèrent significativement de zéro (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/6 = 0.008$  pour chaque Matériau).**

L'ANOVA à mesures répétées a également montré une interaction significative entre *Matériau*, *Distance cible*, et *Essai* ( $F(9, 288) = 1.93, p = 0.048$ ) pour l'erreur spatiale (voir Figure 4.2.5). Une première ANOVA sur l'erreur spatiale à l'essai 1, avec *Matériau* et *Distance cible* comme facteurs intra-sujet, a montré que celle-ci varie en fonction du *Matériau* ( $M_{\text{alu}} = -7.92\%$ ,  $M_{\text{balsa}} = -15.16\%$ ),  $F(1, 32) = 6.14, p = 0.019$ , bien que l'erreur spatiale n'ait pas varié avec la distance de la cible ( $M_{25\text{cm}} = -11.91\%$ ,  $M_{50\text{cm}} = -11.17\%$ ),  $F(1, 32) = 0.07, p = 0.789$ . De plus, les deux

facteurs n'ont pas interagi sur l'erreur spatiale,  $F(1, 32) = 1.68, p = 0.20$ . Les tests  $t$  corrigés par Bonferroni (avec  $\alpha = 0.05/4$ ) ont mis en évidence que l'erreur spatiale dans l'essai 1 différait significativement de 0% uniquement pour le balsa (condition 25 cm :  $t(32) = 3.78, p < 0.001$  ; condition 50 cm :  $t(32) = 6.17, p < 0.001$ ), comme en attestent les astérisques dans la Figure 4.2.5.



**Figure 4.2.5. Performance et adaptation motrice en fonction du Matériau de la surface et de la Distance cible, (moyenne  $\pm$  erreur-type).** L'adaptation motrice entre les essais est observée principalement pour le balsa (panneaux de droite), ce qui correspond à des conditions plus exigeantes afin de contrecarrer l'effet de la friction sur le déplacement du cube. Les ajustements exponentiels avec  $R^2 > 0.75$  sont illustrés par des courbes et les astérisques indiquent que l'erreur spatiale moyenne initiale et finale diffèrent significativement de zéro (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/4 = 0.008$  pour chaque Matériau).

La signature d'une adaptation via la modulation exponentielle du comportement moteur (avec  $R^2 > 0.75$ ), qu'il s'agisse de l'erreur spatiale ou de la vitesse initiale du cube, a été observée dans

chaque condition, sauf pour l'erreur spatiale dans la condition d'une distance cible de 50 cm pour l'aluminium (voir Figure 4.2.5.). Cependant, dans cette sous-condition, l'absence d'ajustement exponentiel pourrait refléter une stratégie exploratoire visant à trouver la meilleure façon de frapper l'objet. Enfin, les tests  $t$  corrigés par Bonferroni (avec  $\alpha = 0.05/4$ ) ont montré que l'erreur spatiale dans l'essai 10 différait significativement de 0% uniquement pour le balsa dans la condition 50 cm,  $t(32) = 4.03$ ,  $p < 0.001$ . Bien que nous n'ayons pas pu mettre en évidence une interaction entre Matériau, Inclinaison, Distance cible et Essai, ni pour l'erreur spatiale ni pour la vitesse initiale du cube, les prochaines analyses examineront l'effet de ces facteurs en fonction du groupe d'ordre des blocs pour étudier la généralisation du  $\mu$  subjectif d'un bloc à l'autre.

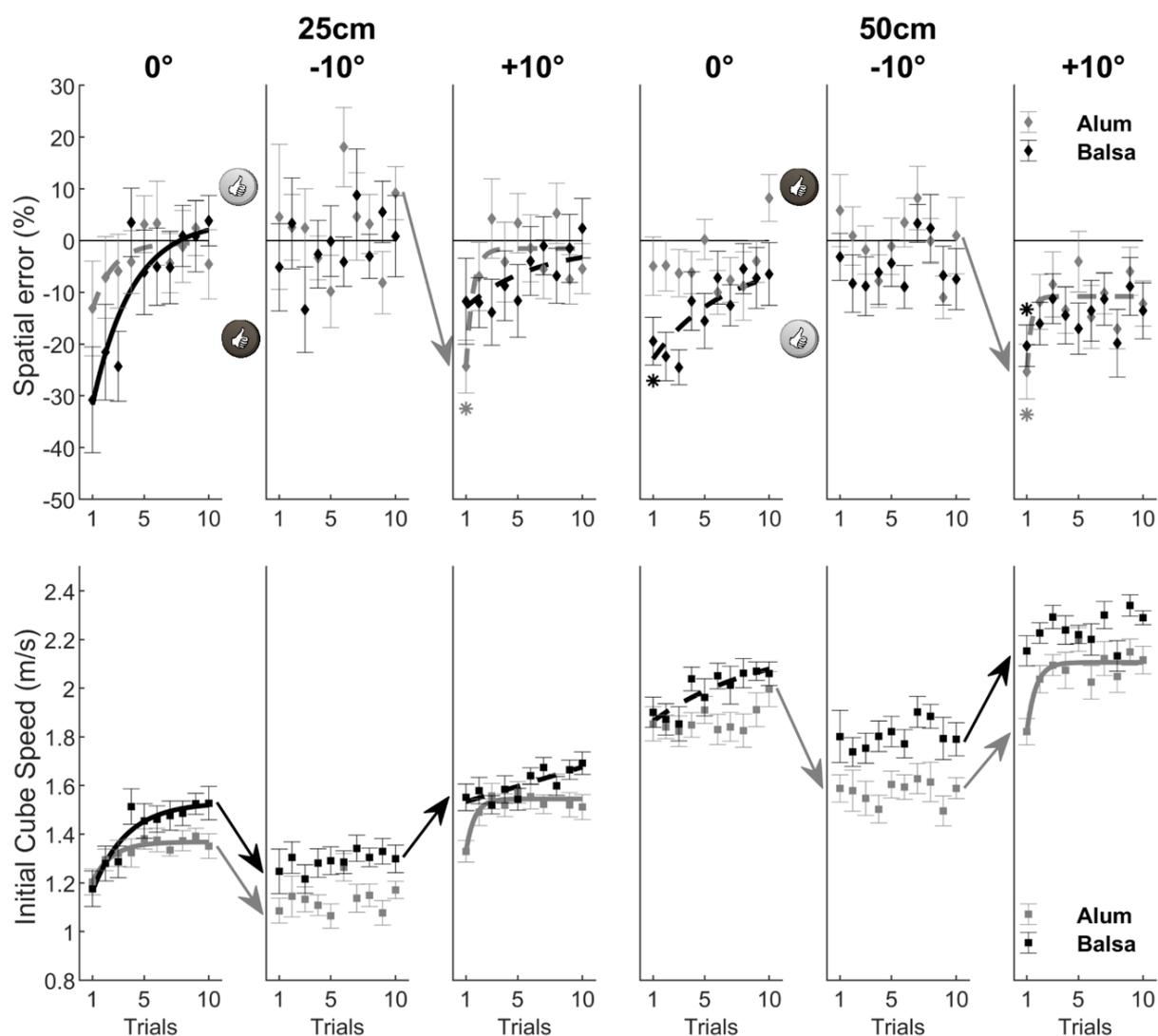
#### **4.2.3.2 Performance et adaptation motrice en fonction de la transition de blocs**

Comme indiqué dans la section 4.2.2.4 *Tâche expérimentale*, l'ordre des blocs d'inclinaison pour un matériau donné différait selon le groupe. Dans un groupe, la condition  $0^\circ$  était suivie de la condition  $-10^\circ$  (groupe d'ordre de blocs " $0^\circ, -10^\circ, +10^\circ$ ") alors qu'elle était suivie de la condition  $+10^\circ$  pour l'autre groupe (groupe d'ordre de blocs " $0^\circ, +10^\circ, -10^\circ$ "). Nous avons donc effectué des analyses supplémentaires afin de tester plus en détail la généralisation du  $\mu$  subjectif lors du passage d'un bloc à l'autre pour un matériau donné. Les preuves en faveur de cette généralisation du  $\mu$  subjectif seront identifiées par des symboles en forme de pouce levé dans les figures qui suivent. Le symbole de pouce levé est affiché lorsque l'erreur spatiale au dernier essai d'une condition et au premier essai de la condition suivante ne différait pas de zéro. De plus, s'il y a généralisation du  $\mu$  subjectif, nous ne nous attendons pas à observer des signes d'adaptation motrice (tel qu'un ajustement exponentiel, marqueur d'une adaptation), ni pour l'erreur spatiale, ni pour la vitesse initiale du cube pour le bloc de la condition suivante. Il faut cependant remarquer qu'en subdivisant nos données en fonction des deux ordres de transition de condition d'inclinaison dans deux graphiques séparés, un certain bruit s'est ajouté au niveau des données recueillies lors des différents essais. En conséquence, afin d'augmenter notre sensibilité pour la détection de l'adaptation motrice, nous avons abaissé le seuil du  $R^2$  à 0.50 (au lieu de 0.75). De même, pour éviter les faux positifs en affirmant que l'erreur spatiale était significativement différente de zéro pour les premier et dernier essais d'une condition,

nous avons utilisé des tests  $t$  avec une nouvelle correction de Bonferroni, soit  $\alpha = 0.05/12 = 0.004$  comme critère de significativité (12 étant le nombre de comparaisons par condition pour un matériau de surface). Enfin, dans le but de conforter statistiquement une preuve en faveur de la généralisation du  $\mu$  *subjectif* lors du passage d'un bloc d'une condition à l'autre, nous avons comparé les performances entre le dernier essai d'un bloc et l'essai initial du bloc suivant, en utilisant des tests  $t$  avec la correction de Bonferroni (le critère de significativité était  $\alpha = 0.05/4 = 0.0125$ , en raison de la comparaison des quatre transitions successives pour un même matériau, ce qui correspond respectivement à la transition entre le premier et le deuxième bloc, ainsi qu'entre le deuxième et le troisième bloc, pour chaque distance cible). Les changements significatifs de performance entre les blocs pour un matériau donné sont illustrés par une flèche dans les Figures 4.2.6. et 4.2.7.

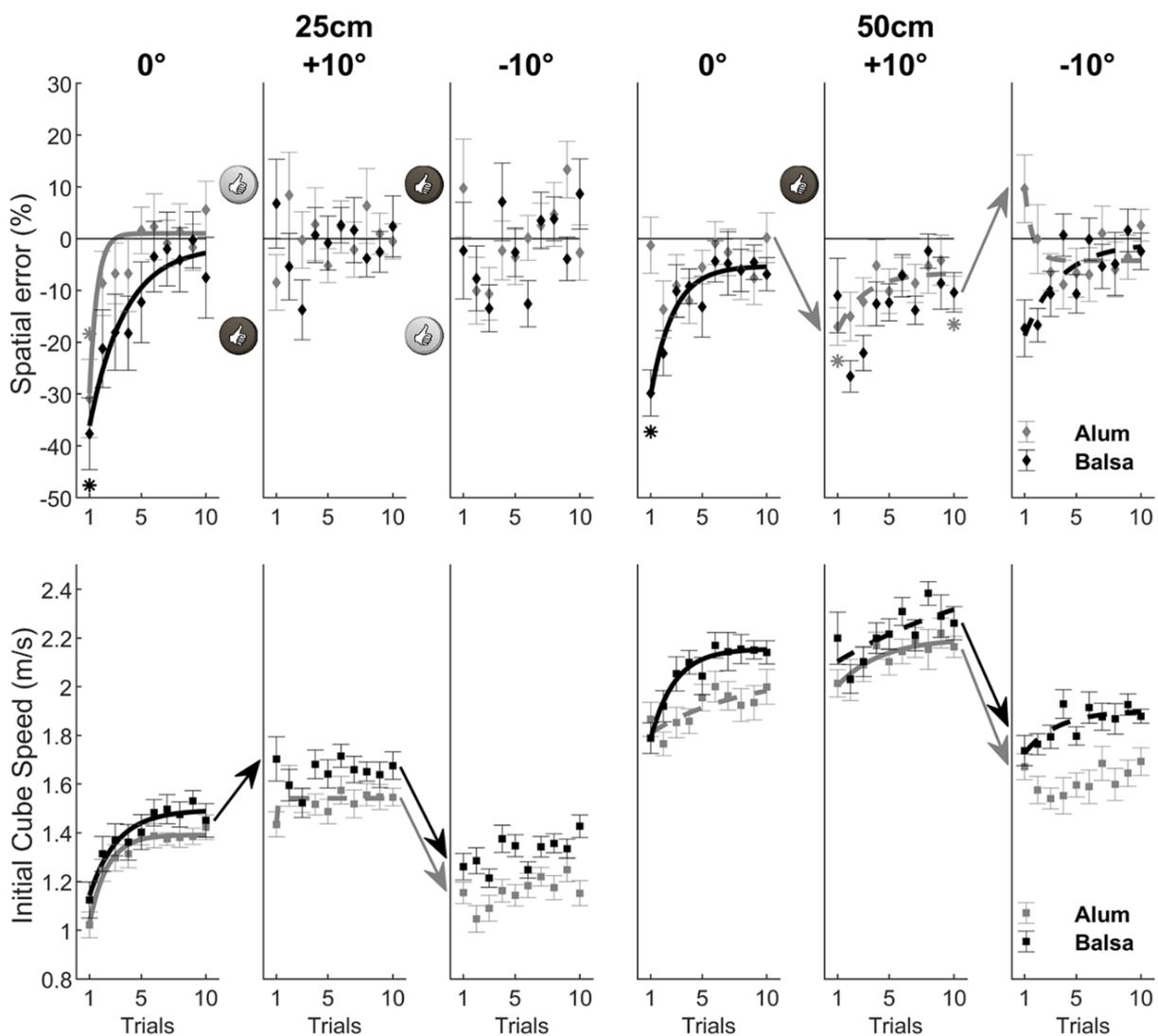
Quand on compare la vitesse initiale du cube dans le premier bloc à  $0^\circ$  pour l'aluminium et pour le balsa, on observe qu'il n'y a pas de différence significative dans la vitesse transmise au cube lors du premier essai pour les deux ordres de blocs " $0^\circ, -10^\circ, +10^\circ$ ",  $t(15) = 0.25, p = 0.8$ , et " $0^\circ, +10^\circ, -10^\circ$ ",  $t(16) = 0.98, p = 0.34$  (voir Figures 4.2.6 et 4.2.7). Ensuite, on observe que les participants vont adapter leur vitesse initiale pour les différentes surfaces afin d'arriver à une performance optimale au dernier essai, on suppose que c'est cette première confrontation aux matériaux de surface à  $0^\circ$  qui leur permet de calibrer leur  $\mu$  *subjectif*. Les panneaux d'erreur spatiale des Figures 4.2.6. et 4.2.7 montrent de nombreux cas de généralisation suggérant que les participants étaient capables de reparamétrer leur mouvement d'un bloc à l'autre sur la base d'un modèle interne de  $\mu$  ( $\mu$  *subjectif*) pour une surface donnée. En revanche, dans d'autres cas (absence de pouce levé dans la transition de blocs), les participants ont eu besoin d'une adaptation motrice plus importante afin d'ajuster leurs valeurs de  $\mu$  *subjectif* par rapport aux invariants physiques de la tâche et ainsi améliorer la paramétrisation du mouvement. Un bref résumé de ces résultats est fourni dans les légendes des Figures 4.2.6. et 4.2.7. Globalement, les résultats pour les deux groupes (voir Figures 4.2.6. et 4.2.7) montrent qu'il est plus facile de généraliser la valeur du  $\mu$  *subjectif* associé à la tâche dans la condition  $0^\circ$  lorsque le bloc suivant a une inclinaison de  $-10^\circ$  ou  $+10^\circ$ . En revanche, la transition entre les blocs de  $-10^\circ$  et  $+10^\circ$  (groupe d'ordre des blocs " $0^\circ, -10^\circ, +10^\circ$ ") nécessite une adaptation motrice et une recalibration de la valeur du  $\mu$  *subjectif*. En effet, les participants ont augmenté la vitesse initiale du cube, mais pas suffisamment, pour faire face à la contrainte accrue de la tâche. Par exemple, les valeurs optimales de la vitesse du cube (voir Tableau 4.2.2) montrent que, lors du passage de  $-10^\circ$  à  $+10^\circ$  pour la distance cible de 50 cm, il faut augmenter la vitesse du cube d'environ

50 % dans la condition balsa (c'est-à-dire de 1.68 m/s à 2.50 m/s) et d'environ 70 % dans la condition aluminium (c'est-à-dire de 1.37 m/s à 2.30 m/s). Pourtant, comme mentionné précédemment, une plus grande vitesse d'apprentissage (pour l'adaptation motrice) pour l'aluminium dans le bloc +10° par rapport au bloc précédent à 0° (voir Figure 4.2.6) suggère une généralisation partielle du modèle interne de  $\mu$  entre les blocs de même matériau. Enfin, la transition entre les blocs +10° et -10° (groupe d'ordre des blocs "0°, +10°, -10°") révèle une bonne reparamétrisation du mouvement pour la distance cible 25 cm sur la base du  $\mu$  *subjectif* établi dans le bloc initial, alors qu'une calibration supplémentaire (par adaptation motrice) est nécessaire dans la condition 50 cm (voir Figure 4.2.7).



**Figure 4.2.6.** La performance et l'adaptation motrice en fonction du Matériau, de l'Inclinaison et de la Distance cible sont illustrées pour les groupes d'ordre de blocs "0°, -10°, +10°", (moyenne  $\pm$  erreur-type). Les preuves en faveur de la généralisation du  $\mu$  *subjectif* entre les blocs pour un matériau donné sont indiquées par des symboles en forme de pouce levé dans le panneau supérieur. Cette généralisation arrive lorsque l'erreur spatiale

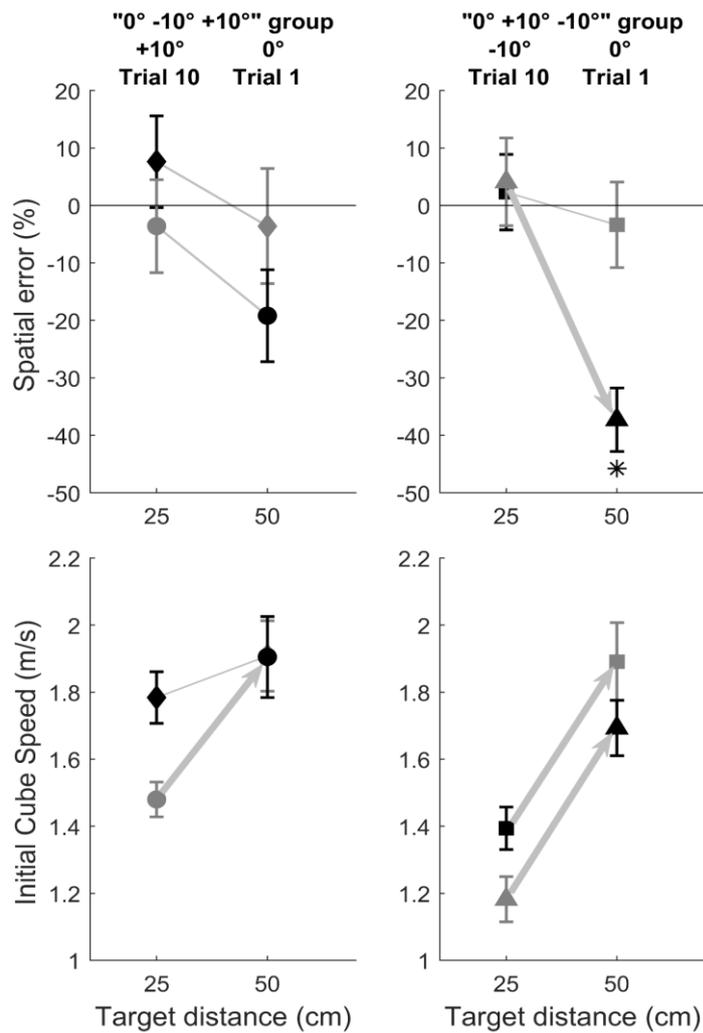
au dernier essai d'un bloc et au premier essai du bloc suivant ne diffèrent pas de zéro (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/12$ ) ; les astérisques illustrent les éléments de preuve allant à l'encontre de l'hypothèse de la généralisation. Les ajustements exponentiels avec  $R^2 > 0.75$  (lignes en continu) et  $R^2 > 0.50$  (lignes en pointillé) apportent des éléments respectivement forts et modérés en faveur d'une adaptation motrice. Les flèches illustrent un changement significatif (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/4$ ) du comportement entre les blocs. Les résultats montrent une adaptation motrice lors du bloc initial d'essais correspondant à l'inclinaison  $0^\circ$  et une distance cible de 25 cm, que ce soit pour la surface aluminium ou balsa selon le groupe (voir Tableau 4.2.1). Cette calibration du  $\mu$  subjectif pour un matériau donné dans la condition  $0^\circ$  a conduit à une reparamétrisation appropriée du mouvement dans la condition suivante  $-10^\circ$  (voir les symboles de pouce levé pour les transitions  $0^\circ$  à  $-10^\circ$ ), et s'accompagne également d'un changement adéquat de la vitesse initiale du cube. En revanche, une adaptation motrice a été nécessaire pour la transition du bloc de  $-10^\circ$  à celui de  $+10^\circ$ .



**Figure 4.2.7.** Identique à la Figure 4.2.6, mais concernant les groupes d'ordre des blocs " $0^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $-10^\circ$ ", (*moyenne  $\pm$  erreur-type*). Encore une fois, les résultats montrent une adaptation motrice au cours du bloc initial d'essais conduisant à une calibration du  $\mu$  subjectif qui a permis une reparamétrisation adéquate du mouvement dans les conditions suivantes de  $+10^\circ$  (voir transition de  $0^\circ$  à  $+10^\circ$ ), sauf pour 50 cm avec l'aluminium. Ensuite,

*la re-paramétrisation du mouvement pour la transition de  $-10^\circ$  à  $+10^\circ$  n'a été réussie (voir les symboles de pouce levé) qu'uniquement dans la condition de distance cible la plus courte (25 cm).*

La transition entre certains blocs était particulièrement contraignante en termes de reparamétrisation du mouvement. En effet, comme il est décrit dans le Tableau 4.2.1, une fois que les participants ont effectué les six blocs dans la condition de distance cible de 25 cm avec changement de matériau, les six blocs suivants sont effectués dans le même ordre dans la condition de distance cible de 50 cm. Ainsi, la transition entre le bloc 6 et le bloc 7 implique un changement de trois propriétés physiques, à savoir : l'inclinaison de la surface, le matériau, et la distance cible. La Figure 4.2.8 illustre le changement de performance entre le dernier essai du bloc 6 (dernier essai à la condition 25 cm) et le premier essai du bloc 7 (premier essai à la condition 50 cm). Nous avons utilisé des tests t avec correction de Bonferroni ( $\alpha = 0.05/4$ ) pour déterminer s'il y avait un changement de performance significatif entre ces deux essais (illustré par des flèches dans la Figure 4.2.8) et s'il y avait une erreur spatiale significative par rapport à zéro (illustrée par des astérisques dans la Figure 4.2.8). Nous avons formulé l'hypothèse que si la performance ne différait pas significativement de zéro après un changement des trois propriétés physiques, cela refléterait une reparamétrisation adéquate du mouvement (afin de fournir la vitesse initiale optimale au cube). Les résultats montrent une reparamétrisation adéquate du mouvement malgré le changement radical des propriétés physiques, à l'exception de la transition la plus exigeante (voir les points de données triangulaires dans la Figure 4.2.8) qui nécessite une augmentation d'environ 120% de la vitesse initiale du cube (cf. le Tableau 4.2.2, la vitesse initiale optimale du cube est de 0.967 m/s pour une distance cible de 25 cm sur la surface en aluminium à  $-10^\circ$ , et elle est de 2.147 m/s pour une distance cible de 50 cm sur la surface en balsa à  $0^\circ$ ).



**Figure 4.2.8. Illustration de la performance après un changement de trois propriétés physiques, c'est-à-dire l'inclinaison de la surface, le matériau et la distance cible, (moyenne  $\pm$  erreur-type). Ce changement correspond à la transition entre le dernier essai du bloc 6 et le premier essai du bloc 7 pour les quatre différents groupes de cette étude (voir le Tableau 4.2.1 pour plus de détails sur l'ordre des blocs). Chaque groupe est illustré par un symbole de point de données différent. Les symboles gris et noirs indiquent respectivement les matériaux aluminium et balsa. Par exemple, les diamants correspondent à un groupe "0°, -10°, +10°" (groupe 1 dans le Tableau 4.2.1) où le dernier essai du bloc 6 correspondait à une inclinaison de +10°, à une surface en balsa et à une distance cible de 25 cm, suivi d'une inclinaison de 0° avec une surface en aluminium et une distance cible de 50 cm. Les astérisques illustrent des différences significatives d'erreur spatiale par rapport à zéro (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0,05/4$ ). Les flèches représentent un changement significatif dans la performance entre les essais d'intérêt (correction de Bonferroni avec  $\alpha = 0.05/4$ ). Les résultats montrent une re-paramétrisation appropriée du mouvement après le changement des trois propriétés physiques, à l'exception de la transition la plus difficile, indiquée par des triangles correspondant à une transition entre la distance cible de 25 cm sur la surface en aluminium à -10° (la vitesse initiale optimale du cube est de 0.967 m/s, voir Tableau 4.2.2) et la distance cible de 50 cm sur la surface en balsa à 0° (la vitesse initiale optimale du cube est de 2.147 m/s, voir Tableau 4.2.2).**

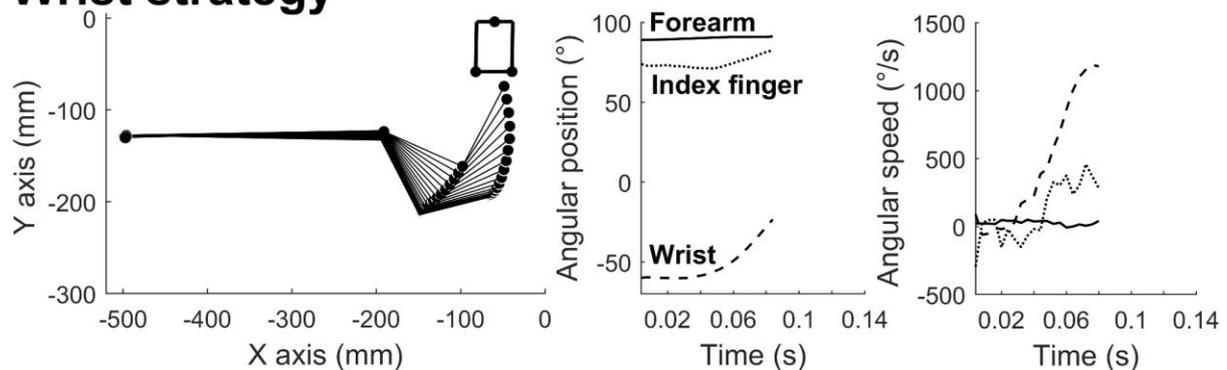
### 4.2.3.3 Coordination motrice

Les participants ont effectué la tâche de frappe avec le coude en appui sur la table. Par conséquent, le mouvement impliquait principalement des rotations de l'avant-bras, du poignet et de l'index. L'augmentation des contraintes de la tâche (dues à l'inclinaison de la surface, à la distance de la cible et au matériau de la surface) correspondait à un continuum de vitesse initiale optimale du cube (Tableau 4.2.2). Par conséquent, nous avons supposé que la paramétrisation du mouvement de frappe refléterait ce continuum. Pour exécuter la tâche avec des conditions de difficultés croissantes, les principaux segments, avec la masse nécessaire pour permettre de réaliser la tâche, étaient l'avant-bras et la main (voir la section 4.2.3.4 *Contrôle de l'énergie cinétique*). Nous avons donc analysé l'amplitude angulaire de l'avant-bras, du poignet et de l'index lors du mouvement de frappe afin de caractériser la variabilité interindividuelle dans la coordination motrice. Nous avons formulé l'hypothèse qu'il existerait deux stratégies motrices recrutant des articulations capables de générer une vitesse initiale du cube à l'impact suffisante pour que le cube atteigne la cible : une coordination s'appuyant principalement sur la rotation du poignet ("stratégie poignet") et une autre sur la rotation de l'avant-bras ("stratégie avant-bras"). Il est important de noter ici que la "stratégie motrice" n'est pas censée refléter un changement qualitatif de la coordination motrice en termes de programme moteur généralisé ou de primitive motrice, mais plutôt une différence quantitative substantielle dans les paramètres du mouvement.

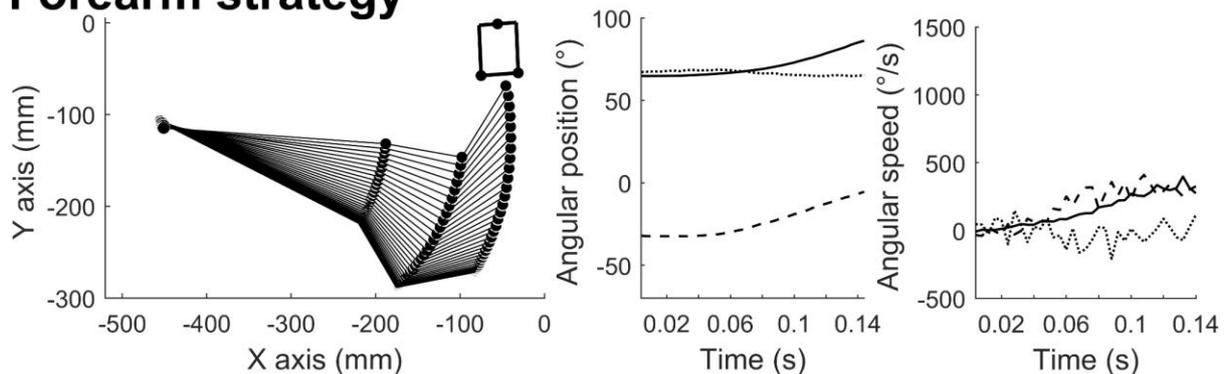
En termes de variable dépendante, la coordination motrice a été étudiée en se basant sur la différence d'amplitude angulaire des articulations entre le début et la fin du mouvement de frappe. L'amplitude angulaire est projetée dans le plan xy (horizontal) qui correspond à celui de la table. Les amplitudes angulaires sur lesquelles nous nous sommes focalisés sont : l'angle de l'avant-bras  $\theta_{\text{Coude}}$ , l'angle du poignet  $\theta_{\text{Poignet}}$  et l'angle de l'index  $\theta_{\text{Index}}$ , au dernier essai (10ème essai de chaque condition). L'angle de l'avant-bras  $\theta_{\text{Coude}}$  est calculé entre l'axe y (aligné avec la gouttière) et l'axe de l'avant-bras (vecteur formé par les centres articulaires du coude et du poignet). Le centre articulaire du poignet est défini comme étant la projection du marqueur styloïde du radius sur le plan xy. L'angle du poignet  $\theta_{\text{Poignet}}$  est formé par l'intersection entre l'axe de l'avant-bras et l'axe de la main (vecteur joignant le centre articulaire du poignet et la tête de la phalange du troisième métacarpe). L'angle de l'index  $\theta_{\text{Index}}$  est formé par l'axe de la main et l'axe de l'index (vecteur formé par la tête de la phalange du deuxième métacarpe et le marqueur placé sur le bout de l'index).

En ce qui concerne l'analyse statistique, nous avons utilisé une classification non hiérarchique de type K-mean ( $K = 2$ ) (Johnson & Wichern, 1988, p. 198) pour séparer les deux stratégies motrices à partir des valeurs moyennes d'amplitude angulaire des articulations (pour les rotations du coude, du poignet et de l'index) pendant le mouvement de frappe au dernier essai de chaque condition. Nous avons formulé l'hypothèse que le dernier essai reflétait une performance optimale avec une coordination relativement stable par rapport aux premiers essais. Quatorze participants ont ainsi été identifiés dans un groupe "stratégie poignet" et dix-neuf dans un groupe "stratégie avant-bras". La Figure 4.2.9. permet d'observer un mouvement de frappe typique d'un participant pour une stratégie motrice donnée, à la distance cible de 50 cm pour la surface en balsa avec une inclinaison de  $0^\circ$ . Cette condition correspond à l'une des conditions les plus exigeantes en termes de vitesse optimale du cube (voir Tableau 4.2.2). La *stratégie poignet* montre une plus grande amplitude angulaire et une plus grande vitesse angulaire pour la rotation du poignet par rapport aux deux autres segments. En revanche, la *stratégie avant-bras* montre un recrutement à la fois de la rotation de l'avant-bras et du poignet. Ce recrutement de différents segments des membres supérieurs dans chaque stratégie est également illustré dans la Figure 4.2.10. où les amplitudes angulaires sont affichées en fonction de la vitesse optimale du cube nécessaire pour atteindre la cible.

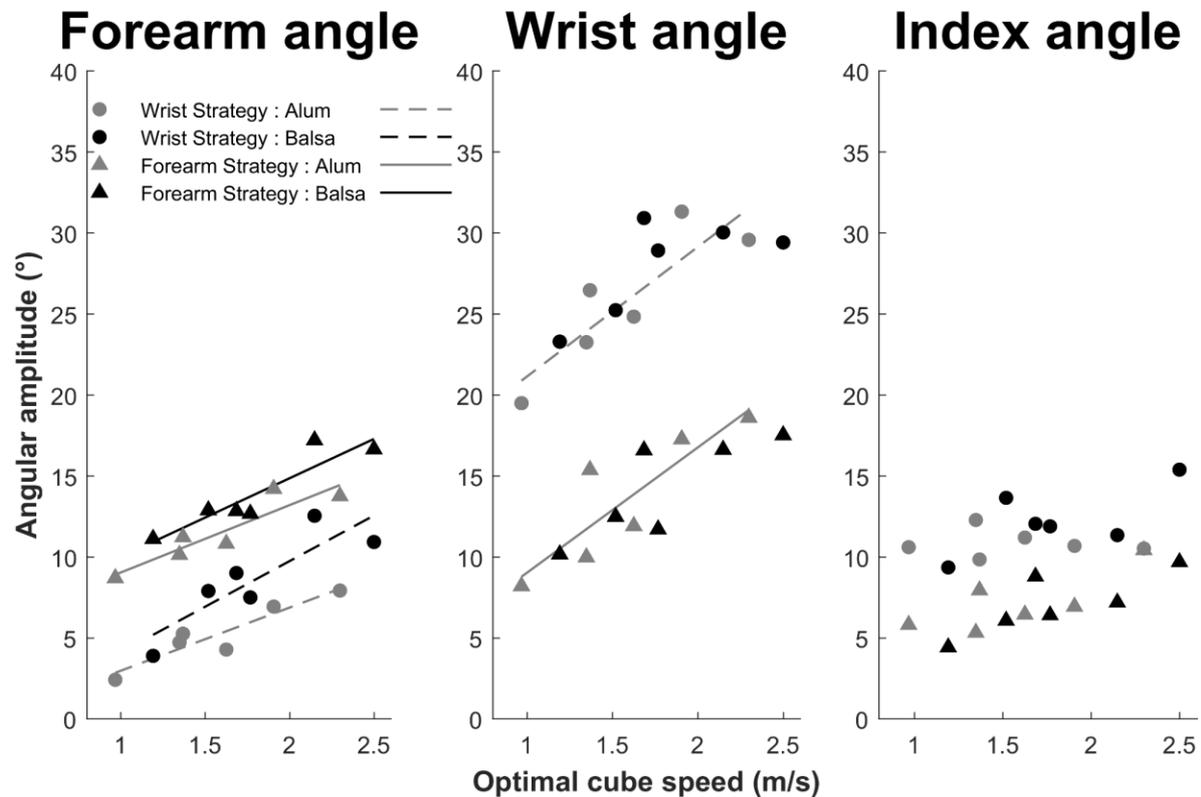
### Wrist strategy



### Forearm strategy



**Figure 4.2.9. Différentes stratégies de coordination motrice.** La figure illustre des kinogrammes du mouvement de frappe, avec les données cinématiques correspondantes, pour la condition d'inclinaison 0°, la distance cible 50 cm, et la surface en balsa, pour un participant de chaque groupe. Le participant ayant adopté la "stratégie poignet" (panneaux supérieurs) présente une plus grande amplitude angulaire et une plus grande vitesse angulaire pour la rotation du poignet, par rapport aux autres segments. En revanche, le participant ayant adopté la "stratégie avant-bras" (panneaux inférieurs) montre un recrutement à la fois de l'avant-bras et du poignet.



**Figure 4.2.10. Paramétrisation de la coordination motrice en fonction de la vitesse optimale du cube reflétant les contraintes physiques de la tâche.** Dans le dernier essai (10ème), les participants montrent une régulation linéaire du mouvement (seuls les  $R^2 > 0.75$  sont illustrés) pour l'amplitude angulaire de l'avant-bras pour les deux matériaux, ainsi que pour l'amplitude angulaire du poignet uniquement sur la surface en aluminium. Les participants adoptant la stratégie poignet montrent une plus grande valeur d'ordonnée à l'origine dans la régulation de l'amplitude angulaire du poignet.

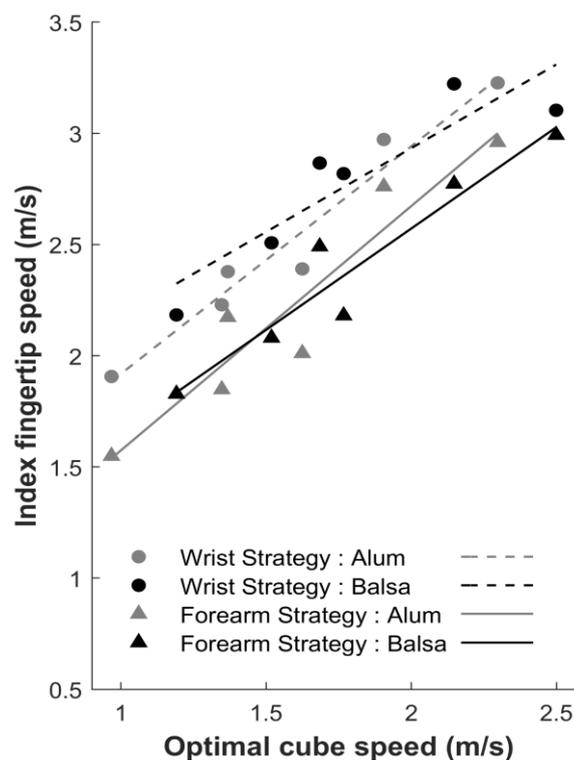
Dans l'hypothèse d'un recrutement linéaire d'une articulation donnée en fonction de l'augmentation de la contrainte de la tâche, nous avons retenu les ajustements linéaires avec  $R^2 > 0.75$  comme significatifs. De manière similaire, les Figures 4.2.9 et 4.2.10 montrent un recrutement équivalent du poignet et de l'avant-bras pour la *stratégie avant-bras*, et un recrutement beaucoup plus important de la rotation du poignet pour la *stratégie poignet*. Afin d'étudier plus en détail la contribution de chaque segment articulaire, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées sur les valeurs de pente et d'ordonnée à l'origine des régressions

individuelles pour chaque amplitude angulaire, en utilisant la *Stratégie motrice* en facteur inter-sujets et le *Matériau* en facteur intra-sujet.

Pour l'amplitude angulaire de l'avant-bras, chaque  $R^2$  était supérieur à 0.75 (voir Figure 4.2.10), et les ANOVA ont montré des ordonnées à l'origine significativement plus élevées uniquement pour la *stratégie avant-bras* ( $M = 5.02^\circ$ ,  $CI = [1.21 ; 8.83]$ ) par rapport à la *stratégie poignet* ( $M = -1.21^\circ$ ,  $IC = [-4.56 ; 2.13]$ ),  $F(1, 31) = 6.22$ ,  $p = 0.018$ , avec une ordonnée à l'origine significative (par rapport à zéro) uniquement pour la *stratégie avant-bras*,  $t(18)=2.77$ ,  $p = 0.013$ . Il n'y avait aucun autre effet principal ou interaction pour l'ordonnée à l'origine. De plus, l'ANOVA sur les pentes des régressions n'a montré aucun effet principal ou interaction, bien que chacune des pentes différait de zéro ( $ps < 0.02$ ). Globalement, ces résultats suggèrent un recrutement initial plus important de la rotation de l'avant-bras pour la *stratégie avant-bras*, et une modulation similaire de l'amplitude de l'avant-bras dans les deux stratégies motrices avec une augmentation de l'amplitude en fonction de la contrainte de la tâche. L'absence d'effet du *Matériau* au sein de chaque groupe reflète simplement le fait que la paramétrisation de l'amplitude angulaire de l'articulation de l'avant-bras est basée sur la vitesse optimale du cube qui varie en fonction de la combinaison des trois propriétés physiques (distance cible, inclinaison et matériau).

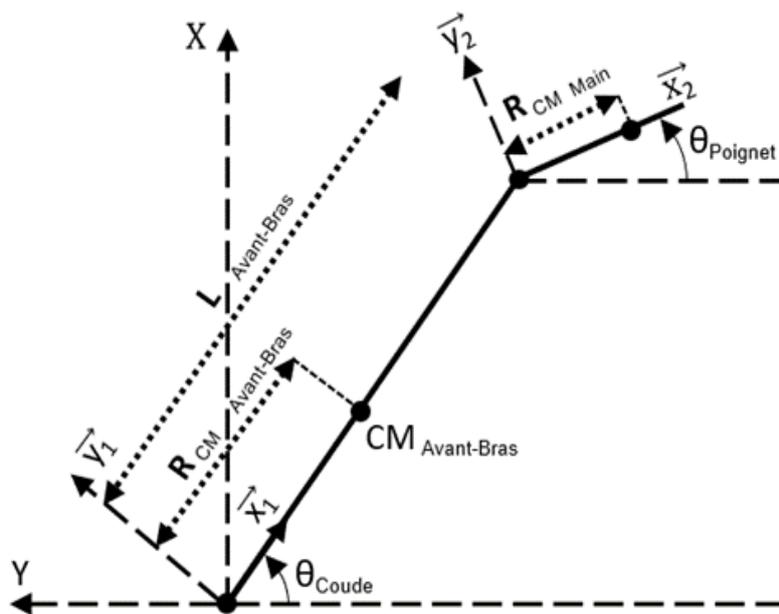
Pour l'amplitude angulaire du poignet, sachant que le critère était  $R^2 > 0.75$ , nous avons dû limiter notre analyse de l'effet de la stratégie motrice au matériau aluminium (voir Figure 4.2.10). L'ordonnée à l'origine était significativement plus grande pour la *stratégie poignet* ( $M = 13.15^\circ$ ,  $IC = [8.01 ; 24.77]$ ) que pour la *stratégie avant-bras* ( $M = 1.30^\circ$ ,  $IC = [1.32 ; 6.89]$ ),  $t(31)=2.37$ ,  $p = 0.024$ , avec une ordonnée à l'origine significative uniquement dans le premier groupe,  $t(13)=4.22$ ,  $p = 0.001$ . En revanche, la pente pour le groupe *stratégie poignet* ( $M = 8.00^\circ/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $IC = [3.32 ; 12.68]$ ) et pour le groupe *stratégie avant-bras* ( $M = 7.73^\circ/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $IC = [3.34 ; 12.12]$ ) ne différait pas significativement,  $t(31)=0.09$ ,  $p = 0.93$ , mais ces groupes différaient tous les deux de zéro ( $ps < 0.003$ ). Ces résultats sont cohérents avec un recrutement initial plus important de la rotation du poignet pour la *stratégie poignet*. Le recrutement non linéaire du poignet dans la condition balsa est probablement dû à un compromis entre le recrutement des articulations du poignet et des doigts pour les conditions plus exigeantes. En effet, l'amplitude angulaire du poignet plafonne lorsque la vitesse optimale du cube est supérieure à 2 m/s, tandis que l'angle des doigts augmente davantage par rapport aux conditions moins exigeantes.

Bien que nous n'ayons trouvé aucune tendance linéaire (chaque  $R^2 < 0.75$ ) concernant l'amplitude angulaire de l'index en fonction de la vitesse optimale du cube, nous avons approfondi l'analyse du contrôle moteur du mouvement de frappe en examinant comment la vitesse du bout de l'index à l'impact était régulée en fonction de la vitesse optimale du cube. Les résultats ont montré que les deux variables étaient liées linéairement, comme l'illustre la Figure 4.2.11. L'ANOVA réalisée sur les valeurs d'ordonnée à l'origine a mis en évidence une ordonnée à l'origine significativement plus grande pour la *stratégie poignet* ( $M = 1.16$  m/s,  $IC = [0.80 ; 1.52]$ ) par rapport à la *stratégie avant-bras* ( $M = 0.61$  m/s,  $IC = [0.38 ; 0.85]$ ),  $F(1,31) = 8.06$ ,  $p = 0.008$ . De plus, l'ordonnée à l'origine pour la surface en balsa ( $M = 1.43$  m/s,  $IC = [0.94 ; 1.91]$ ) est significativement plus grande que pour la surface en aluminium ( $M = 0.90$  m/s,  $IC = [0.52 ; 1.28]$ ),  $F(1, 31) = 8.19$ ,  $p = 0.007$ , reflétant le fait que pour le balsa, une plus grande vitesse de l'index est nécessaire à l'impact afin de contrecarrer l'effet plus important de la friction lors du déplacement du cube. Aucun des deux facteurs n'interagit avec la vitesse du doigt au moment de l'impact pour l'ordonnée à l'origine,  $F(1, 31) = 0.84$ ,  $p = 0.37$ , n.s. L'ANOVA réalisée sur les pentes a montré uniquement un effet significatif du *Matériau*,  $F(1, 31) = 8.67$ ,  $p = 0.006$ , avec une pente plus importante pour la surface en aluminium ( $M = 1.02$  m/s,  $CI = [0.76 ; 1.29]$ ) par rapport à la surface en balsa ( $M = 0.75$  m/s,  $CI = [0.49 ; 1.01]$ ). Ces résultats suggèrent que la friction plus importante du balsa empêche une régulation plus fine du mouvement (une pente plus petite correspond à une variation plus faible de la vitesse de l'index).



**Figure 4.2.11. Variabilité individuelle dans la paramétrisation du mouvement.** L'influence des deux stratégies motrices au dernier essai est également représentée au niveau distal par la régulation linéaire de la vitesse de l'index à l'impact en fonction de la vitesse optimale du cube. Afin d'atteindre la quantité de EC (énergie cinétique) requise à l'impact, les participants ayant adopté la stratégie avant-bras ont globalement réduit la vitesse du bout du doigt à l'impact par rapport à l'autre stratégie, en raison de la masse plus importante du segment corporel mis en mouvement.

#### 4.2.3.4 Contrôle de l'énergie cinétique



**Figure 4.2.12. Schéma illustrant la modélisation du mouvement de frappe dans le plan horizontal de la table pour calculer l'énergie cinétique EC en s'inspirant de Winter (2009).**

Afin de pouvoir calculer l'énergie cinétique de l'avant-bras (Équation 4.2.4.) et de la main (Équation 4.2.5.), nous avons tout d'abord calculé les paramètres biomécaniques nécessaires (Figure 4.2.12). La longueur des segments ( $L$ ) a été mesurée en respectant les recommandations de l'ISB (Wu et al., 2005). Les paramètres suivants ont été calculés à partir des tables anthropométriques de de Leva (1996, p. 2009) : la longueur entre le centre articulaire et le centre de masse du segment ( $R$ ), la masse du segment d'un membre ( $m$ ) et l'inertie du segment ( $I$ ). En suivant les recommandations de Winter (2009), les angles de l'avant-bras  $\theta_{\text{Coude}}$  et du poignet  $\theta_{\text{Poignet}}$  ont été déterminés comme étant l'angle d'ouverture par rapport à l'axe  $Y$  (sens de déplacement du cube).

A partir de ces données anthropométriques, nous avons calculé l'énergie cinétique (EC) produite lors de l'impact entre le membre supérieur et le cube. Nous avons estimé l'énergie cinétique totale du membre supérieur ( $EC_{\text{Totale}}$ ) comme étant la somme de l'EC de l'avant-bras ( $EC_{\text{Avant-bras}}$ ) et de l'EC de la main ( $EC_{\text{Main}}$ ) en utilisant les équations suivantes adaptées de Winter (2009) :

$$EC_{\text{Avant-Bras}} = \frac{1}{2} m_{\text{Avant-Bras}} \{[- R_{\text{CM\_Avant-Bras}} \dot{\theta}_{\text{Coude}} \sin(\theta_{\text{Coude}})]^2 + [R_{\text{CM\_Avant-Bras}} \dot{\theta}_{\text{Coude}} \cos(\theta_{\text{Coude}})]^2\} + \frac{1}{2} I_{\text{Avant-Bras}} \dot{\theta}_{\text{Coude}}^2$$

Équation 4.2.4.

$$EC_{\text{Main}} = \frac{1}{2} m_{\text{Main}} \{[- L_{\text{Avant-Bras}} \dot{\theta}_{\text{Coude}} \sin(\theta_{\text{Coude}}) - R_{\text{CM\_Main}} \dot{\theta}_{\text{Poignet}} \sin(\theta_{\text{Poignet}})]^2 + [L_{\text{Avant-Bras}} \dot{\theta}_{\text{Coude}} \cos(\theta_{\text{Coude}}) + R_{\text{CM\_Main}} \dot{\theta}_{\text{Poignet}} \cos(\theta_{\text{Poignet}})]^2\} + \frac{1}{2} I_{\text{Main}} \dot{\theta}_{\text{Poignet}}^2$$

Équation 4.2.5.

$$EC_{\text{Totale}} = EC_{\text{Avant-bras}} + EC_{\text{Main}}$$

Équation 4.2.6.

Enfin, nous avons calculé l'EC du cube après l'impact avec l'Équation suivante :

$$EC_{\text{Cube}} = \frac{1}{2} m_{\text{Cube}} \text{Vitesse}_{\text{Cube}}^2$$

Équation 4.2.7.

Le cube étant bloqué latéralement dans une gouttière, seule la composante translationnelle sur l'axe Y a été prise en compte pour l' $EC_{\text{Cube}}$ .

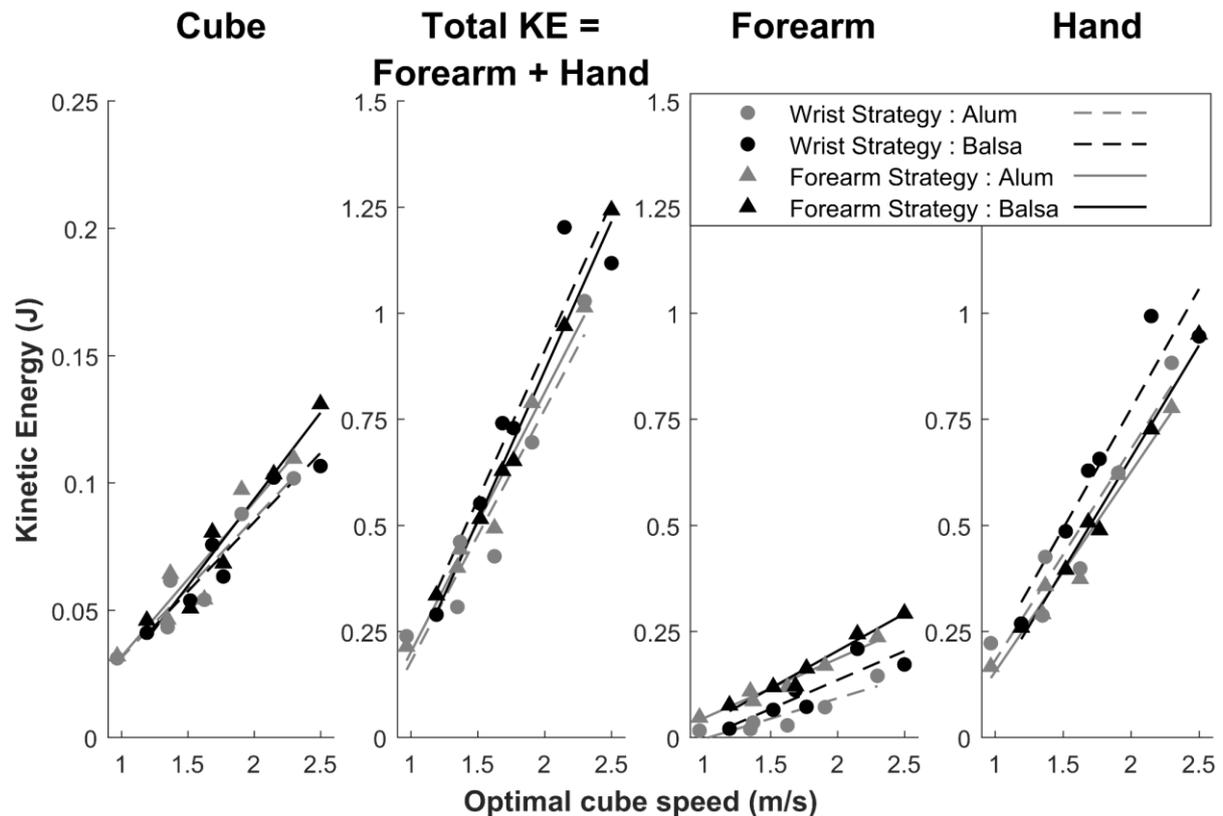
En ce qui concerne les analyses statistiques, afin d'étudier les différences de comportement liées à la coordination motrice, nous avons d'abord examiné si l'erreur spatiale moyenne et la vitesse du cube à la fin de l'impact variaient en fonction de la coordination motrice (*stratégie poignet vs stratégie avant-bras*). Les deux groupes ne différaient pas, que ce soit en termes d'erreur spatiale moyenne (*stratégie poignet*  $M = -4.45 \%$ ,  $SE = 2.47$  ; *stratégie avant-bras*  $M = -0.02 \%$ ,  $SE = 2.18$ ,  $t(31) = 1.33$ ,  $p = 0.19$ ), ou en termes de vitesse initiale du cube après l'impact (*stratégie poignet*  $M = 1.68$  m/s,  $SE = 0.03$  ; *stratégie avant-bras*  $M = 1.74$  m/s,  $SE = 0.02$ ,  $t(31) = 1.66$ ,  $p = 0.11$ ). Cependant, la vitesse du bout de l'index au moment de l'impact était significativement plus élevée dans le groupe *stratégie poignet* ( $M = 2.62$  m/s,  $SE = 0.11$ ) que dans le groupe *stratégie avant-bras* ( $M = 2.25$  m/s,  $SE = 0.07$ ),  $t(31) = 3.20$ ,  $p = 0.003$ .

Afin de comprendre la raison d'une performance similaire (erreur spatiale) entre les deux stratégies motrices malgré une différence de vitesse du bout de l'index au moment de l'impact, nous avons étudié l'énergie cinétique totale du membre supérieur lors de l'impact ( $EC_{\text{Totale}}$ ). Il

s'agit de la somme de l'énergie cinétique de l'avant-bras et de la main (Équation 4.2.6.). Nous avons formulé l'hypothèse que l'énergie cinétique totale est le paramètre physique qui doit être contrôlé par le cerveau pendant le mouvement de frappe afin d'envoyer le cube à la distance cible, distance cible correspondant à une vitesse optimale à donner au cube après l'impact. Réciproquement, la vitesse initiale du cube après l'impact est la conséquence cinématique de l' $EC_{\text{Cube}}$  transmis à l'impact par le bout du doigt au cube.

La Figure 4.2.13. illustre la relation entre les variables cinétiques (du membre supérieur et du cube) et la variable cinématique de la vitesse du cube à l'impact correspondant aux valeurs de vitesse optimale du cube dans toutes les conditions expérimentales (cf. Tableau 4.2.2.). Pour atteindre une distance cible spécifique, une quantité particulière de l'EC totale est nécessaire, quelle que soit la stratégie motrice. La qualité des ajustements linéaires suggère que les participants ayant adopté la *stratégie avant-bras* ( $0.96 \leq R^2 \leq 0.99$ ) régulaient mieux l'EC du membre supérieur pour les mouvements de frappe au dixième essai que le groupe ayant choisi la *stratégie poignet* ( $0.79 \leq R^2 \leq 0.92$ ). Cependant, concernant les valeurs de l'EC du membre supérieur, les ANOVA sur les pentes et les ordonnées à l'origine des régressions n'ont montré aucun effet principal du groupe de *Stratégie motrice* ou du *Matériau*, ni aucune interaction entre les deux facteurs (tous les  $ps > 0.16$ ). En revanche, l' $EC_{\text{Cube}}$  a révélé des valeurs de pentes légèrement supérieures pour la *stratégie avant-bras* ( $M = 0.064$  J,  $IC = [0.058 ; 0.071]$ ) par rapport à la *stratégie poignet* ( $M = 0.055$  J,  $IC = [0.047 ; 0.062]$ ),  $F(1,31) = 4.08$ ,  $p = 0.052$ , sans effet du *Matériau*, ni d'interaction entre les facteurs. En outre, les ordonnées à l'origine ne variaient pas ( $ps > 0.12$ ). La plus grande pente pour l' $EC_{\text{Cube}}$  dans la *stratégie avant-bras* par rapport à la *stratégie poignet* (ainsi que l'ordonnée à l'origine similaire) reflète le fait qu'il y a plus d'EC fournie par la plus grande quantité de masse du segment en mouvement (avant-bras), en particulier avec l'augmentation de la vitesse optimale du cube. De plus, ce résultat fait écho à la performance d'erreur spatiale plus proche de l'optimum pour la *stratégie avant-bras* ( $M = -0.02$  %) par rapport à la *stratégie poignet* ( $M = -4.45$  %) ; voir ci-dessus. Enfin, l'EC moyenne de l'avant-bras était significativement plus élevée pour la *stratégie avant-bras* ( $M = 0.15$  J) que pour la *stratégie poignet* ( $M = 0.08$  J),  $t(31)=2.64$ ,  $p = 0.013$ , bien que les deux groupes ne diffèrent pas significativement pour l' $EC_{\text{Main}}$  et l' $EC_{\text{Totale}}$  (tous deux  $ps > 0.11$ ). Ce résultat suggère qu'en raison de la plus grande quantité d' $EC_{\text{Avant-bras}}$  dans le groupe *stratégie avant-bras*, les participants ont réduit la vitesse de l'index à l'impact (par rapport à la *stratégie poignet*) afin d'atteindre une  $EC_{\text{Total}}$  équivalente dans les deux groupes. Cependant, bien que l' $EC_{\text{Totale}}$  prédit linéairement l' $EC_{\text{Cube}}$  (*stratégie poignet*  $R^2 = 0.92$  ; *stratégie avant-bras*  $R^2 =$

0.96), la pente de l' $EC_{Cube}$  en fonction de l' $EC_{Totale}$  est loin de 1 (Pente *stratégie poignet* = 0.075 ; Pente *stratégie avant-bras* = 0.097), ce qui reflète le fait que l'efficacité de transfert de l'EC ( $EC_{Cube}/EC_{Totale}$ ) n'est que d'environ 10%. Les 90% restants sont conservés dans le mouvement du bras après le contact et dans la déformation du bout du doigt pendant le contact.



**Figure 4.2.13. Régulation de l'énergie cinétique à l'impact.** Cette figure illustre (au dernier essai) que la régulation du mouvement est linéairement déterminée par la quantité d'énergie cinétique à l'impact nécessaire pour transmettre au cube la vitesse optimale correspondant aux différentes contraintes de la tâche

#### 4.2.3.5 Evolution du contrôle de l'énergie cinétique en fonction des conditions expérimentales

Afin de mieux comprendre comment l'erreur spatiale (exprimée en pourcentage de la distance cible) est expliquée par l'énergie cinétique du cube qui elle-même dépend de l'énergie cinétique de la rotation de l'avant-bras et de la main, nous avons mené une analyse en piste causale illustrée Figure 4.2.14. D'un point de vue opérationnel, cette analyse correspond à deux analyses de régressions séparées: une régression multiple qui prédit l' $EC_{Cube}$  à partir de l' $EC_{Avant-bras}$  et de l' $EC_{Main}$  (flèches rouges de la Figure) et une régression simple qui prédit l'erreur spatiale  $\epsilon_{cube}$  en fonction de l' $EC_{Cube}$  (flèche violette). L'évolution du contrôle de

l'énergie cinétique en fonction des contraintes de la tâche a été examinée au travers des valeurs de coefficient standardisé  $\beta$  des régressions par condition expérimentale (cf. Tableau 4.2.3). Le détail de cette analyse en piste causale est présenté en Annexe 7.6. et, ci-dessous, se trouve un tableau de synthèse. Par ailleurs, afin d'analyser comment cette évolution est possiblement modulée par la stratégie motrice, nous avons fait l'ensemble de ces régressions pour chaque groupe, séparément.

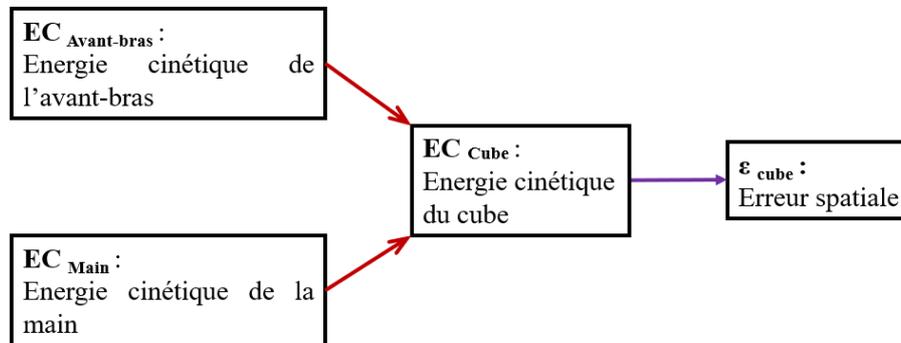
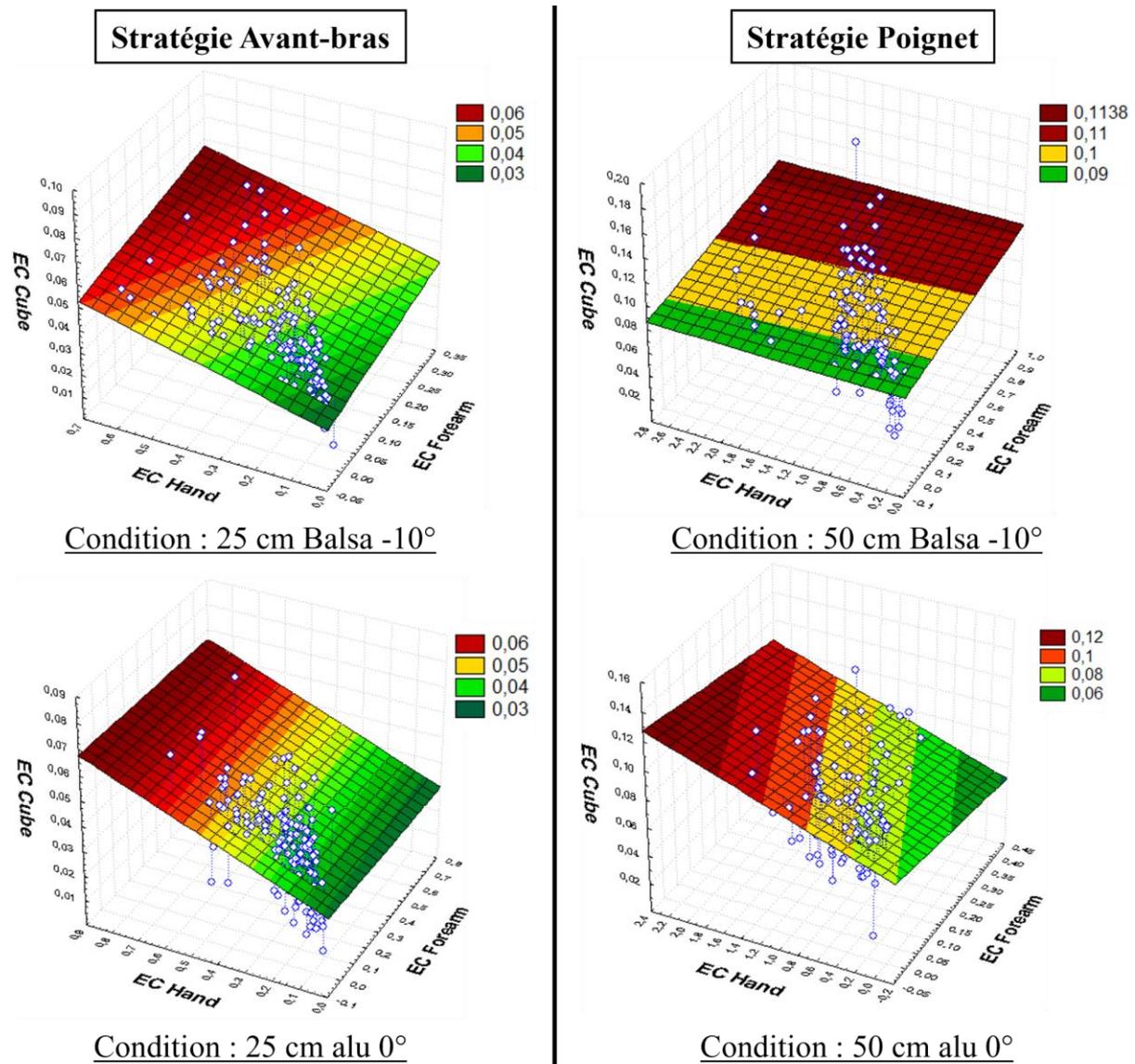


Figure 4.2.14 Schéma de l'analyse en piste causale de l'erreur spatiale en fonction de l'énergie cinétique à l'impact

| Variable dépendante<br>Variable indépendante |       |      | Stratégie Avant-bras |         |        | Stratégie Poignet |         |        |
|--|-------|------|----------------------|---------|--------|-------------------|---------|--------|
|  |       |      | EC Cube              |         | ε Cube | EC Cube           |         | ε Cube |
|  |       |      | EC Avant-bras        | EC Main |        | EC Avant-bras     | EC Main |        |
| 50cm   | Balsa | +10° | 0,23                 | 0,30    | 0,92   | 0,03              | 0,28    | 0,76   |
|  |       | 0°   | 0,24                 | 0,32    | 0,94   | 0,09              | 0,01    | 0,96   |
|  |       | -10° | 0,20                 | 0,39    | 0,88   | 0,23              | 0,16    | 0,80   |
|  | Alu   | +10° | -0,06                | 0,26    | 0,93   | -0,06             | 0,26    | 0,93   |
|  |       | 0°   | 0,44                 | 0,07    | 0,81   | -0,21             | 0,35    | 0,84   |
|  |       | -10° | 0,31                 | 0,46    | 0,71   | -0,07             | 0,29    | 0,63   |
| 25cm   | Balsa | +10° | 0,17                 | 0,33    | 0,92   | 0,15              | 0,34    | 0,91   |
|  |       | 0°   | 0,26                 | 0,37    | 0,97   | 0,00              | 0,40    | 0,97   |
|  |       | -10° | 0,18                 | 0,43    | 0,92   | 0,07              | 0,20    | 0,85   |
|  | Alu   | +10° | 0,14                 | 0,34    | 0,92   | 0,14              | 0,22    | 0,73   |
|  |       | 0°   | -0,01                | 0,44    | 0,89   | 0,12              | 0,24    | 0,86   |
|  |       | -10° | -0,09                | 0,53    | 0,72   | 0,22              | 0,14    | 0,66   |

**Tableau 4.2.3. Synthèse de l'analyse en piste causale pour le contrôle de l'énergie cinétique en fonction des conditions expérimentales et de chaque groupe de stratégie motrice.** Les valeurs de coefficient standardisé  $\beta$  sont en rouge quand elles sont significatives (au seuil  $\alpha = 0.05$ ). Pour les régressions multiples où les deux valeurs  $\beta$  sont significatives, les valeurs  $\beta$  descriptivement plus importantes sont dans des cases en jaune.



**Figure 4.2.15. Illustration des données ayant servi aux régressions multiples prédisant l'EC<sub>Cube</sub> pour certaines conditions de chaque groupe.** Pour la stratégie avant-bras (à gauche): en bas, la condition 25 cm alu 0° où le seul prédicteur de l'EC<sub>Cube</sub> était l'EC<sub>Main</sub>,  $\beta = 0.44$ ; et en haut, la condition 25 cm balsa -10° avec 2 prédicteurs significatifs (EC<sub>Main</sub>,  $\beta = 0.43$ , et EC<sub>Avant-bras</sub>,  $\beta = 0.18$ ). Pour la stratégie poignet (à droite): en bas, la condition 50 cm alu 0° avec 2 prédicteurs significatifs (EC<sub>Main</sub>,  $\beta = -0.21$ , et EC<sub>Avant-bras</sub>,  $\beta = 0.35$ ); et en haut, la condition 50 cm balsa -10° où aucun prédicteur n'était significatif.

Tout d'abord, on constate qu'en moyenne l'énergie cinétique du cube ( $EC_{\text{Cube}}$ ) est un bon prédicteur de l'erreur spatiale ( $\epsilon_{\text{cube}}$ ) que ce soit pour la stratégie avant-bras ( $M = 0.88 \beta$ ,  $SE = 0.02$ ) ou pour la stratégie poignet ( $M = 0.82 \beta$ ,  $SE = 0.03$ ). Ensuite, en examinant l'évolution des valeurs de coefficient standardisé  $\beta$  en fonction des contraintes de la tâche (globalement en lisant le tableau de bas en haut) nous pouvons déterminer si les participants conservent ou non leur stratégie motrice (avant-bras ou poignet) avec l'augmentation des contraintes de la tâche.

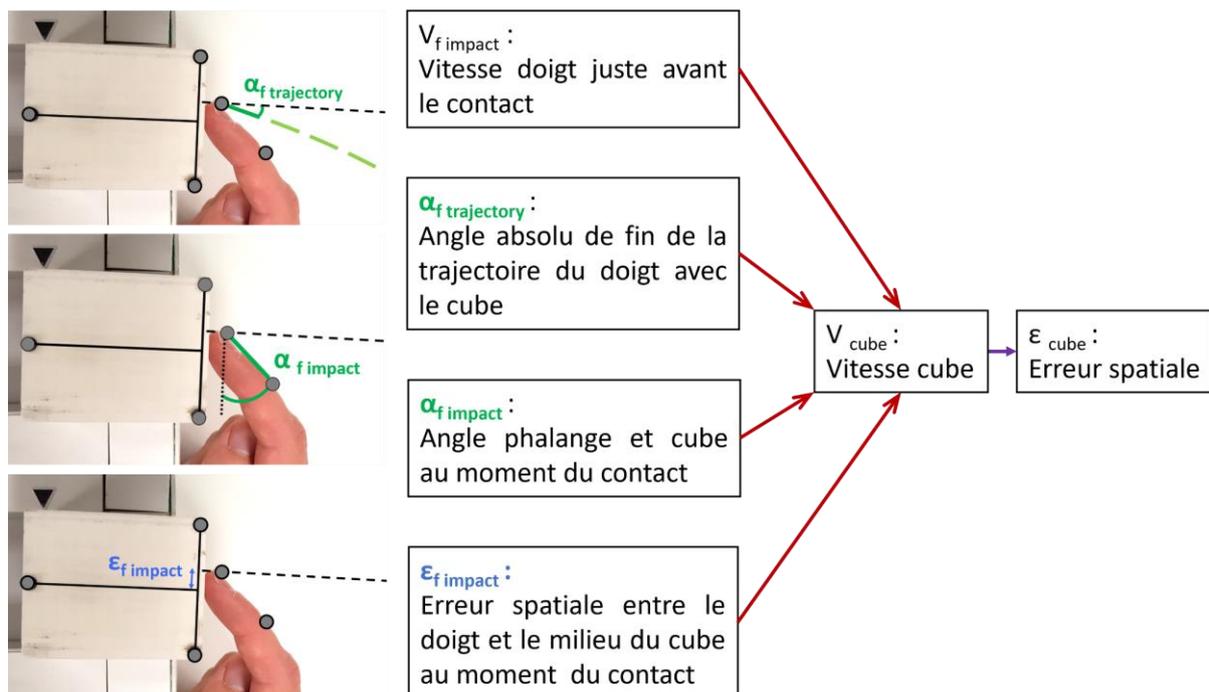
En préambule, il convient de rappeler ici que les participants commençaient par des blocs d'essais à 25 cm. Pour la *stratégie avant-bras*, lorsque les participants découvrent la surface aluminium (surface ayant le coefficient de frottement le plus faible), on observe qu'à la distance cible de 25 cm les participants vont seulement solliciter l'énergie cinétique de la main (valeurs en rouge en bas à gauche du Tableau 4.2.3.). En revanche, ensuite, lorsque les contraintes de la tâche augmentent et qu'une quantité d'EC plus importante est nécessaire, l'énergie cinétique de l'avant-bras va s'ajouter à celle de la main : c'est le cas pour le balsa à 25 cm, et pour les essais de la distance cible à 50 cm.

Pour la *stratégie poignet*, à la distance cible de 25 cm, on constate que c'est surtout l'énergie cinétique de la main qui est régulée, alors que lorsque la distance augmente à 50 cm, parfois l'énergie cinétique de l'avant-bras est également régulée. Dans ce dernier cas, cette régulation va dans le sens d'augmenter l' $EC_{\text{Avant-bras}}$  (Figure 4.2.15 condition 50 cm balsa  $-10^\circ$ ), ou bien de diminuer la contribution de l' $EC_{\text{Avant-bras}}$  au geste tout en augmentant celle de l' $EC_{\text{Main}}$  (Figure 4.2.15 condition 50 cm alu  $0^\circ$ ). Les données de ces deux tendances sont illustrées dans la partie droite de la Figure 4.2.15. Autant à 50 cm pour l'aluminium l' $EC_{\text{Main}}$  permet de prédire l' $EC_{\text{Cube}}$ , autant lorsque les participants sont confrontés au balsa à 50 cm, on observe une forte variabilité dans le contrôle de l'EC suggérant une difficulté de régulation du geste due à la forte contrainte de la tâche. Ce résultat confirme les données de la Figure 4.2.10 sur la paramétrisation de la coordination motrice en fonction de la vitesse optimale du cube au dernier essai, où l'on constate que l'amplitude angulaire de la main plafonne pour les valeurs de la vitesse optimale du cube supérieures à 2 m/s.

Dans l'ensemble, ces analyses suggèrent une différence de régulation en fonction du groupe. Pour la *stratégie poignet*, quand les contraintes sont faibles, les participants régulent essentiellement l'EC de la main, alors que lorsque les contraintes sont élevées la régulation de l'EC de l'avant-bras semble difficile, même si une régulation de l'amplitude angulaire existe

au dernier essai (cf. Figure 4.2.10). Par contre, pour la *stratégie avant-bras*, quand les contraintes sont faibles, les participants régulent essentiellement l'EC de la main (Figure 4.2.15 panneau en bas à gauche), comme pour l'autre groupe ; alors que lorsque les contraintes augmentent, ces participants sont capables de réguler à la fois l'EC de l'avant-bras et de la main (Figure 4.2.15 panneau en haut à gauche).

#### 4.2.3.6 Régulation de la phalange de l'index durant les conditions



**Figure 4.2.16.** Schéma représentant les paramètres cinématiques de la phalange à l'impact retenus pour l'analyse en piste causale

Afin de mieux comprendre comment l'erreur spatiale (exprimée en pourcentage de la distance cible) est expliquée par la vitesse du cube à l'impact qui elle-même dépend de plusieurs paramètres cinématiques de la phalange à l'impact (qui contribuent à transmettre la vitesse au cube nécessaire pour minimiser l'erreur spatiale), nous avons mené une analyse en piste causale illustrée Figure 4.2.16. D'un point de vue opérationnel, cette analyse correspond à deux analyses de régressions séparées: une régression multiple qui prédit  $V_{\text{cube}}$  à partir de  $V_{f \text{ impact}}$  ;  $\alpha_{f \text{ trajectory}}$  ;  $\alpha_{f \text{ impact}}$  et  $\epsilon_{f \text{ impact}}$  (flèches rouges de la Figure) et une régression simple qui prédit l'erreur spatiale  $\epsilon_{\text{cube}}$  en fonction de  $V_{\text{cube}}$  (flèche violette).

Nous avons sélectionné quatre paramètres pour expliquer la vitesse du cube par régression multiple (Tableau 4.2.4.). Tout d’abord, il y a  $V_{f\text{ impact}}$ , qui est la vitesse du marqueur placé sur l’ongle de la phalange distale de l’index juste avant le moment du contact. Ensuite, il y a  $\alpha_{f\text{ trajectory}}$  qui est l’angle absolu formé entre le vecteur déterminé par le déplacement (sur les deux derniers pas de temps avant contact) du marqueur du bout de l’index, et la droite normale à la face du cube. Puis, il y a  $\alpha_{f\text{ impact}}$ , qui est l’angle formé entre la face du cube et le vecteur de la dernière phalange de l’index au moment du contact ; ce dernier vecteur est déterminé par le segment qui lie le marqueur placé sur le bout de la phalange distale de l’index avec celui placé sur la tête de la phalange médiale de l’index. Enfin, il y a  $\varepsilon_{f\text{ impact}}$ , qui est l’erreur spatiale déterminée au moment de l’impact entre le marqueur sur l’extrémité de la phalange distale et le milieu du cube dans le plan horizontal. Comme pour l’analyse en piste causale précédente, le détail des analyses est présent en Annexe 7.7. et, ci-dessous, se trouve un tableau de synthèse. Pour la vitesse initiale du cube, noté ici  $V_{\text{cube}}$ , nous avons utilisé la vitesse maximale du cube à partir du moment où l’objet s’est mis en mouvement.

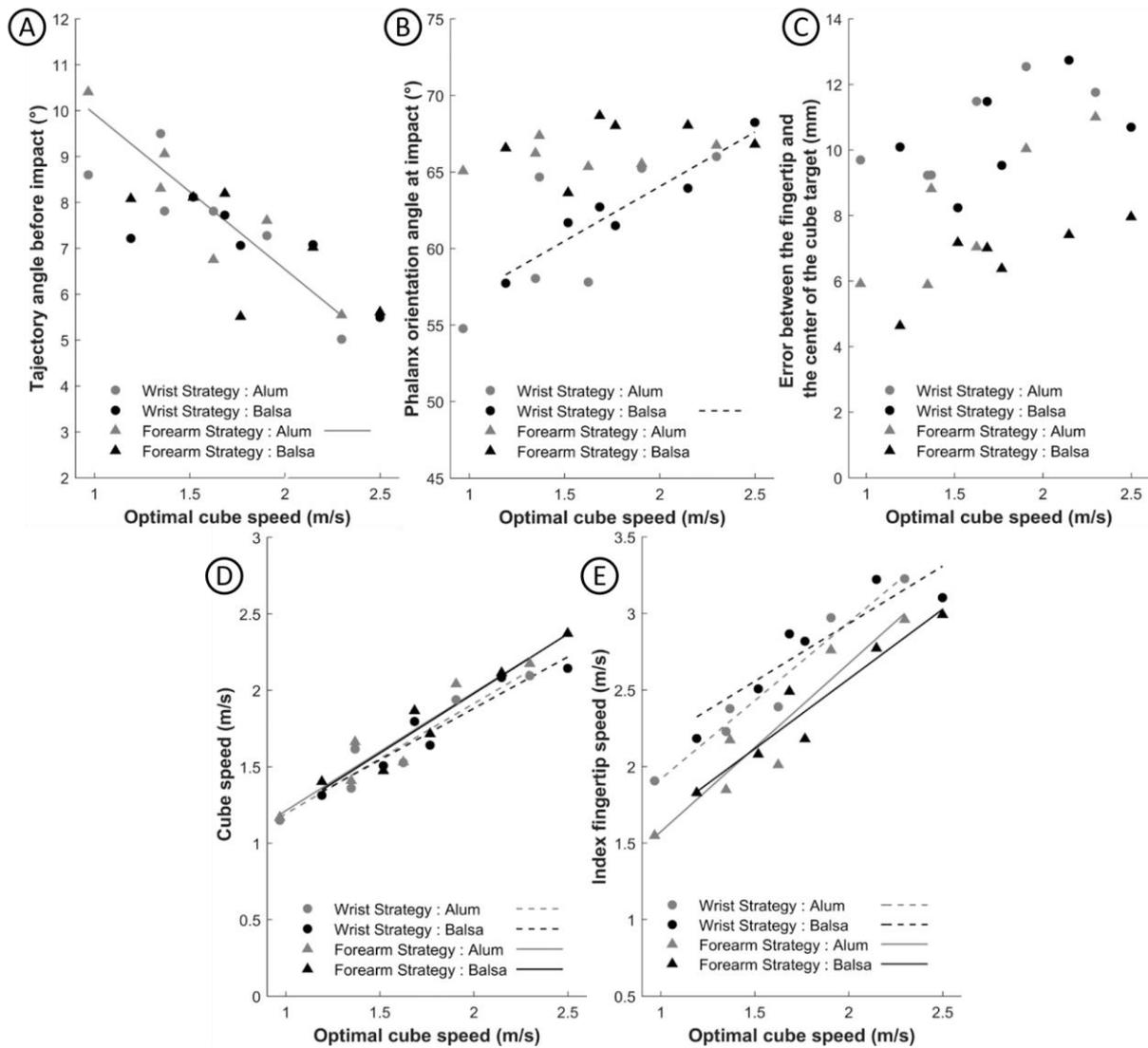
| Variable dépendante<br>Variable indépendante |       |      | Stratégie Avant-bras |                          |                      |                           |                             | Stratégie Poignet |                 |                          |                      |                             |
|--|-------|------|----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|
|  |       |      | $V_{\text{Cube}}$    |                          |                      |                           | $\varepsilon_{\text{Cube}}$ | $V_{\text{Cube}}$ |                 |                          |                      | $\varepsilon_{\text{Cube}}$ |
|  |       |      | $V_f$<br>impact      | $\alpha_f$<br>trajectory | $\alpha_f$<br>impact | $\varepsilon_f$<br>impact |                             | $V$<br>Cube       | $V_f$<br>impact | $\alpha_f$<br>trajectory | $\alpha_f$<br>impact |                             |
| 50cm   | Balsa | +10° | 0.39                 | -0.12                    | 0.18                 | -0.24                     | 0.92                        | 0.34              | -0.18           | 0.19                     | 0.15                 | 0.76                        |
|  |       | 0°   | 0.52                 | -0.27                    | 0.40                 | -0.06                     | 0.94                        | 0.24              | -0.19           | 0.35                     | 0.11                 | 0.96                        |
|  |       | -10° | 0.46                 | -0.19                    | 0.27                 | 0.06                      | 0.88                        | 0.48              | -0.08           | 0.09                     | -0.03                | 0.81                        |
|  | Alu   | +10° | 0.30                 | -0.12                    | 0.22                 | -0.14                     | 0.89                        | 0.41              | 0.05            | 0.20                     | -0.01                | 0.93                        |
|  |       | 0°   | 0.37                 | -0.11                    | 0.1                  | 0.03                      | 0.82                        | 0.45              | -0.02           | 0.24                     | -0.1                 | 0.85                        |
|  |       | -10° | 0.60                 | -0.12                    | 0.39                 | -0.05                     | 0.73                        | 0.52              | -0.04           | 0.07                     | -0.12                | 0.65                        |
| 25cm   | Balsa | +10° | 0.51                 | -0.26                    | 0.1                  | -0.04                     | 0.92                        | 0.47              | -0.21           | 0.46                     | 0.05                 | 0.90                        |
|  |       | 0°   | 0.44                 | -0.33                    | 0.35                 | 0.09                      | 0.97                        | 0.44              | -0.25           | 0.38                     | 0.19                 | 0.97                        |
|  |       | -10° | 0.46                 | -0.29                    | 0.22                 | 0.08                      | 0.91                        | 0.51              | -0.05           | 0.26                     | -0.13                | 0.86                        |
|  | Alu   | +10° | 0.47                 | 0.11                     | 0.08                 | -0.08                     | 0.91                        | 0.37              | -0.12           | 0.16                     | 0.22                 | 0.71                        |
|  |       | 0°   | 0.56                 | -0.27                    | 0.01                 | -0.03                     | 0.90                        | 0.45              | -0.08           | 0.30                     | -0.03                | 0.86                        |
|  |       | -10° | 0.65                 | -0.22                    | 0.19                 | <0.001                    | 0.73                        | 0.54              | -0.1            | -0.04                    | 0.01                 | 0.68                        |

Tableau 4.2.4. Synthèse de l’analyse en piste causale pour déterminer l’erreur spatiale en fonction de la vitesse du cube qui dépend d’un ensemble de paramètres cinématiques pour chaque stratégie motrice. Tableau des

valeurs de coefficient standardisé  $\beta$ , avec en rouge les valeurs positives et en bleu les valeurs négatives, lorsqu'elles sont significatives au seuil  $\alpha < 0.05$ .

Tout d'abord, on constate qu'en moyenne la vitesse du cube à l'impact ( $V_{\text{cube}}$ ) est un bon prédicteur de l'erreur spatiale ( $\epsilon_{\text{cube}}$ ) que ce soit pour la stratégie avant-bras ( $M = 0.88 \beta$ ,  $SE = 0.02$ ) ou pour la stratégie poignet ( $M = 0.83 \beta$ ,  $SE = 0.03$ ). Ensuite, examinons l'évolution des valeurs de coefficient standardisé  $\beta$  en fonction des contraintes de la tâche (globalement en lisant le tableau de bas en haut), pour  $V_{\text{cube}}$  en fonction des paramètres cinématiques de la phalange à l'impact, pour déterminer si les participants gardent ou non leur stratégie motrice (avant-bras ou poignet) avec l'augmentation des contraintes de la tâche.

Tout d'abord, on remarque que, quel que soit le groupe et la condition expérimentale, le meilleur prédicteur de la vitesse du cube  $V_{\text{cube}}$  à l'impact est la vitesse de l'index avant impact  $V_{f \text{ impact}}$  (stratégie avant-bras  $M = 0.48 \beta$ ,  $SE = 0.03$ ; stratégie poignet  $M = 0.45 \beta$ ,  $SE = 0.03$ ) (Figure 4.2.17.D-E). Là où les groupes semblent se distinguer, c'est pour la trajectoire d'approche de la phalange ( $\alpha_{f \text{ trajectory}}$ ) et l'angle de l'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_{f \text{ impact}}$ ). Le contrôle de la trajectoire d'approche de la phalange ( $\alpha_{f \text{ trajectory}}$ ) pour déterminer la vitesse du cube  $V_{\text{cube}}$  à l'impact semble être surtout important pour le groupe *stratégie avant-bras*. C'est visible à la fois dans a) le nombre plus important de valeurs négatives significatives du coefficient de standardisé  $\beta$  dans le Tableau de synthèse 4.2.4. des régressions menées sur l'ensemble des données de l'expérience, et b) la régression significative ( $R^2 > 0.75$ ) illustrée dans la Figure 4.2.17.A pour la condition aluminium du groupe stratégie avant-bras, au dernier essai. Par contre, le contrôle de l'angle de l'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_{f \text{ impact}}$ ) semble être particulièrement nécessaire pour le groupe *stratégie poignet*, en particulier quand les contraintes de la tâche augmentent. En effet, d'une part, la seule régression significative au dernier essai de  $\alpha_{f \text{ impact}}$  en fonction de la vitesse optimale du cube est celle du groupe *stratégie poignet* pour le balsa (Figure 4.2.17.B), et d'autre part, seules les données de ce groupe montrent que pour les conditions les plus exigeantes ( $0^\circ$  et  $+10^\circ$  pour balsa), quelle que soit la distance cible, il est nécessaire de contrôler  $\alpha_{f \text{ impact}}$  en plus de  $\alpha_{f \text{ trajectory}}$  et  $V_{\text{cube}}$  à l'impact (Tableau 4.2.4.). Enfin, au regard des résultats de la régression multiple sur l'ensemble des données (Tableau 4.2.4.) ainsi que ceux pour le dernier essai (Figure 4.2.17.C), il semblerait que le contrôle de l'écart entre le bout du doigt à l'impact et le centre de la cible ( $\epsilon_{f \text{ impact}}$ ) ne soit pas déterminant pour la régulation du geste.



**Figure 4.2.17.** (A) Régulation de l'écart angulaire à une trajectoire d'approche perpendiculaire avant impact ( $\alpha_{f\text{ trajectory}}$ ); (B) Régulation de l'orientation de la phalange par rapport à la face du cube à l'impact ( $\alpha_{f\text{ impact}}$ ); (C) Variabilité de l'écart entre le bout du doigt et le centre de la face du cube ( $\epsilon_{f\text{ impact}}$ ); (D) Vitesse du cube donnée par les participants en fonction de la difficulté de la tâche; (E) Variabilité individuelle dans la paramétrisation du mouvement. Pour les stratégies motrices avant-bras et main, les variables ( $\alpha_{f\text{ trajectory}}$ ,  $\alpha_{f\text{ impact}}$ ,  $\epsilon_{f\text{ impact}}$ ,  $V_{\text{cube}}$  et  $V_{f\text{ impact}}$ ) sont en fonction de la vitesse optimale au dernier essai, les régressions sont affichées seulement si  $R^2 > 0.75$ .

#### 4.2.3.7 Stratégies spatio-temporelles du contrôle de la frappe

Nous avons étudié la régulation spatio-temporelle adoptée par chaque participant durant la phase de frappe en nous intéressant au contrôle des paramètres : a) de durée de la frappe (entre le moment où la frappe est initiée et le moment du contact avec l'objet), b) de la vitesse

du bout de l'index à l'impact, et c) de l'amplitude de la frappe (distance entre le centre de la cible sur le cube et le bout de l'index quand le mouvement de frappe est initié). Pour chacun des participants, des corrélations  $r$  de Bravais-Pearson entre trois paramètres ont été calculées sur la base des données des 120 essais réalisés, à savoir entre: *Durée frappe et Vitesse impact* ; *Durée frappe et Amplitude frappe* ; et *Vitesse impact et Amplitude frappe* . Ces valeurs de corrélation  $r$  sont rassemblées dans le Tableau 4.2.5 et classées par ordre croissant de la corrélation entre *Durée frappe et Vitesse impact*. En examinant cette première colonne, on constate trois modes de régulation différents : des participants montrant des valeurs de corrélations négatives  $-0.65 < r < -0.15$  suggérant une augmentation de la vitesse en diminuant la durée du geste ; d'autres montrant une corrélation très faible  $-0.15 < r < +0.15$  suggérant une régulation basée sur l'amplitude du geste de frappe ; et d'autres montrant des valeurs de corrélations positives  $+0.15 < r < +0.45$  suggérant une augmentation de la vitesse en modulant l'accélération du geste avant l'impact.

| Sujet   | Durée & Vitesse | Durée & Amplitude | Vitesse & Amplitude |
|---------|-----------------|-------------------|---------------------|
| sujet29 | -0,60           | 0,15              | 0,43                |
| sujet50 | -0,54           | 0,15              | 0,51                |
| sujet37 | -0,53           | -0,19             | 0,83                |
| sujet41 | -0,50           | 0,28              | 0,55                |
| sujet27 | -0,46           | 0,65              | 0,21                |
| sujet14 | -0,45           | 0,21              | 0,55                |
| sujet16 | -0,36           | 0,29              | 0,69                |
| sujet10 | -0,36           | 0,36              | 0,64                |
| sujet20 | -0,36           | 0,03              | 0,68                |
| sujet19 | -0,34           | -0,08             | 0,84                |
| sujet44 | -0,34           | 0,15              | 0,78                |
| sujet26 | -0,12           | 0,45              | 0,65                |
| sujet38 | -0,09           | 0,23              | 0,81                |
| sujet17 | -0,08           | 0,32              | 0,77                |
| sujet33 | -0,03           | 0,60              | 0,65                |
| sujet21 | -0,02           | 0,49              | 0,51                |
| sujet32 | 0,04            | 0,46              | 0,69                |
| sujet42 | 0,05            | 0,42              | 0,81                |
| sujet46 | 0,07            | 0,28              | 0,88                |
| sujet30 | 0,08            | 0,50              | 0,79                |
| sujet13 | 0,10            | 0,50              | 0,82                |
| sujet45 | 0,11            | 0,57              | 0,74                |
| sujet11 | 0,19            | 0,65              | 0,69                |
| sujet31 | 0,27            | 0,75              | 0,72                |
| sujet39 | 0,27            | 0,71              | 0,75                |
| sujet43 | 0,27            | 0,79              | 0,69                |
| sujet40 | 0,28            | 0,88              | 0,60                |
| sujet25 | 0,29            | 0,62              | 0,76                |
| sujet18 | 0,32            | 0,81              | 0,68                |
| sujet36 | 0,38            | 0,73              | 0,78                |
| sujet12 | 0,39            | 0,64              | 0,90                |
| sujet35 | 0,40            | 0,74              | 0,82                |
| sujet24 | 0,44            | 0,57              | 0,83                |

**Tableau 4.2.5 Données individuelles des corrélations ( $r$ ) entre: *Durée frappe et Vitesse impact* ; *Durée frappe et Amplitude frappe* ; et *Vitesse impact et Amplitude frappe*..**

Afin de confirmer statistiquement l'existence de ces trois modes de régulation, nous avons réalisé un clustering avec la méthode des K-mean ( $K = 3$ ) sur les valeurs  $r$  du tableau une fois converties en valeurs  $Z$  de Fisher avec l'Équation suivante :

$$Z = 0.5[\ln(1+r) - \ln(1-r)] \quad \text{Équation 4.2.8.}$$

Le clustering a extrait trois groupes de 11 participants chacun, illustrés dans la Figure 4.2.18 : Cluster 1 “réduction de la durée de frappe” (pour les participants ayant montré des corrélations négatives entre *Durée frappe* et *Vitesse impact*) ; Cluster 2 “Durée de frappe constante” ; Cluster 3 “augmentation de la durée de frappe” (pour les participants ayant montré des corrélations positives entre *Durée frappe* et *Vitesse impact*). Dans un premier temps, nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées sur ces données avec les trois *Corrélations entre paramètres* (*Durée frappe* et *Vitesse impact* ; *Durée frappe* et *Amplitude frappe* ; et *Vitesse impact* et *Amplitude frappe*.) en facteur intra-sujet, et les trois Clusters en facteur inter-sujets. L'ANOVA a montré un effet principal du facteur *Corrélations entre paramètres*,  $F(2, 60) = 165.49$ ,  $p \leq 0.001$ , ainsi que pour le facteur Clusters,  $F(2, 30) = 127.28$ ,  $p < 0.001$ . Parce que l'interaction entre ces deux facteurs s'est avérée significative,  $F(4, 60) = 6.51$ ,  $p < 0.001$ , nous allons surtout décrire cette dernière. Pour ce faire, nous avons choisi de faire des sous-ANOVA par *Corrélations entre paramètres* afin, d'une part, de tester s'il y avait un effet du facteur *Cluster* et, d'autre part, de savoir si les moyennes de chaque Cluster différaient de zéro (correction de Bonferroni).

L'ANOVA sur les valeurs  $Z$  des corrélations entre *Durée frappe* et *Vitesse impact* a montré un effet significatif du facteur *Cluster*,  $F(2, 30) = 192.34$ ,  $p < 0.001$ . Les tests post-hocs avec correction de Bonferroni ont montré que les Clusters différaient significativement les uns des autres avec  $ps < 0.001$ . Les comparaisons des moyennes à zéro des valeurs  $Z$  des corrélations entre *Durée frappe* et *Vitesse impact* pour chacun des groupes reflètent parfaitement le clustering, à savoir : le Cluster 1 “réduction de la durée de frappe” montre des valeurs négatives significativement différentes de zéro ( $M = -0.48$ ,  $SE = 0.03$ ),  $p < 0.001$ ; le Cluster 2 “Durée de frappe constante” montre une valeur moyenne non différente de zéro ( $M = 0.02$ ,  $SE = 0.03$ ),  $p = 1$  ; et le Cluster 3 “augmentation de la durée de frappe” montre des valeurs positives significativement différentes de zéro ( $M = 0.33$ ,  $SE = 0.03$ ),  $p < 0.001$ .

L'ANOVA sur les valeurs  $Z$  des corrélations entre *Durée frappe* et *Amplitude frappe* a montré un effet significatif du facteur *Cluster*, ( $F(2, 30) = 35.34$ ,  $p < 0.001$ ). Les tests post-hocs avec correction de Bonferroni ont montré que les clusters différaient significativement les

uns des autres avec  $ps < 0.01$ . Les comparaisons des moyennes à zéro des valeurs Z des corrélations entre  $Durée_{frappe}$  et  $Vitesse_{impact}$ , montrent des valeurs positives significativement différentes de zéro pour les trois Clusters,  $p \leq 0.01$  : Cluster 1 ( $M = 0.20$ ,  $SE = 0.06$ ), Cluster 2 ( $M = 0.48$ ,  $SE = 0.06$ ) et Cluster 3 ( $M = 0.93$ ,  $SE = 0.06$ ).

Enfin, l'ANOVA sur les valeurs Z des corrélations entre  $Vitesse_{impact}$  et  $Amplitude_{frappe}$  n'a révélé qu'un effet marginal du facteur *Cluster*, ( $F(2, 30) = 3.03$ ,  $p = 0.063$ ). En effet, les valeurs moyennes des trois Clusters sont relativement proches, et ne diffèrent pas significativement les unes de autres,  $ps > 0.10$  (correction de Bonferroni) : Cluster 1 ( $M = 0.76$ ,  $SE = 0.08$ ), Cluster 2 ( $M = 0.98$ ,  $SE = 0.08$ ) et Cluster 3 ( $M = 1$ ,  $SE = 0.08$ ).

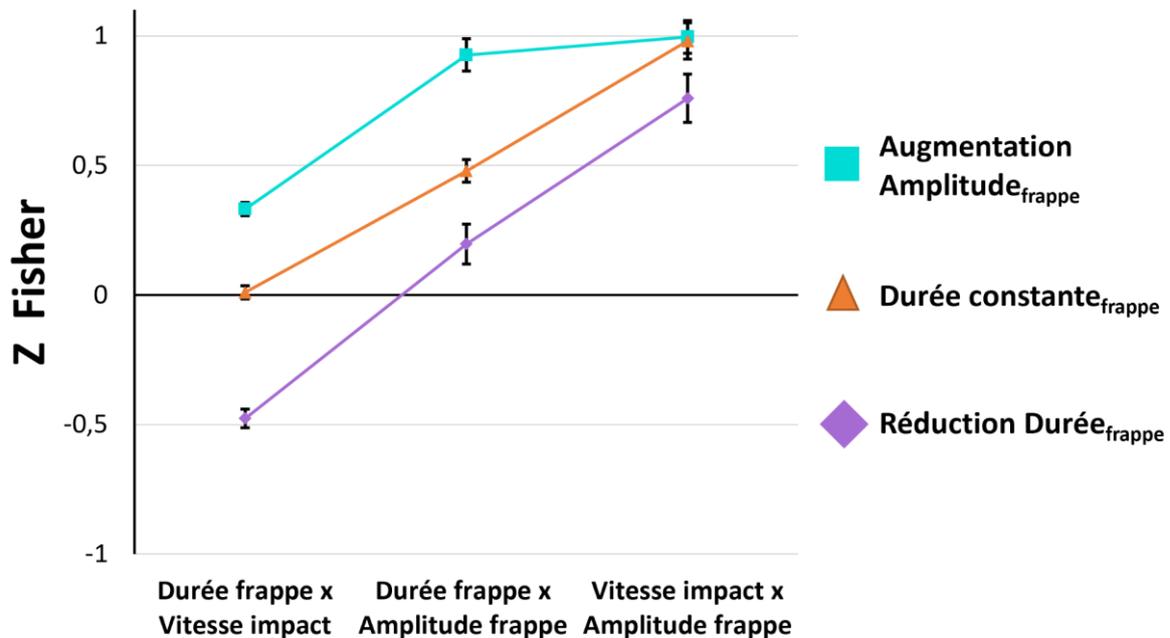


Figure 4.2.18 Interaction entre les facteurs Corrélations entre paramètres, sur les valeurs Z des corrélations, (moyenne  $\pm$  erreur-type).

Afin d'avoir une bonne idée de chaque stratégie spatio-temporelle du contrôle de la frappe, nous avons choisi d'illustrer les données individuelles typiques de chaque stratégie. D'une part, nous allons montrer la cinématique du doigt pour les conditions les plus extrêmes (la moins exigeante étant  $25\text{ cm alu } -10^\circ$  et la plus exigeante étant  $50\text{ cm balsa } +10^\circ$ ) pour un individu typique d'une stratégie spatio-temporelle donnée et, d'autre part, nous allons montrer les données de l'ensemble des participants de chaque stratégie spatio-temporelle en utilisant des variables inspirées de Craig et al. (2000). En l'occurrence, un paramètre lié à la durée de la frappe, à savoir  $1/(\text{durée de frappe})^2$ , et un paramètre lié à l'amplitude de la frappe, à savoir

$Amplitude_{frappe}^2$  ( $Amplitude_{frappe}$  au carré). A la différence de Craig et collaborateurs (2000) qui quantifiaient ces valeurs sur l'ensemble du swing au putting, c'est-à-dire au-delà de l'impact avec la balle, nous n'avons considéré que la phase de frappe qui s'arrête au moment du contact du doigt avec le cube. Une autre différence est que Craig et ses collaborateurs étudiaient ces paramètres en fonction de la distance du put, alors que dans notre cas nous avons étudié ces paramètres en fonction de la vitesse optimale du cube pour chaque condition.

Comme illustré précédemment dans la Figure 4.2.18, les trois Clusters montrent une corrélation entre  $Vitesse_{impact}$  et  $Amplitude_{frappe}$ . Cette relation est visible dans les pentes d' $Amplitude_{frappe}^2$  en fonction de la vitesse optimale du cube dans les panneaux B des trois figures suivantes (4.2.20, 4.2.22 et 4.2.24), une figure par Cluster. Même si les trois Clusters ne diffèrent pas en moyenne dans leur corrélation entre  $Vitesse_{impact}$  et  $Amplitude_{frappe}$  (Figure 4.2.18), ces trois figures montrent que la variabilité interindividuelle de la relation linéaire entre  $Amplitude_{frappe}^2$  et vitesse optimale du cube est plus forte dans le Cluster 3 que dans le Cluster 1. Cela suggère que le Cluster 3 a un contrôle spatio-temporel plus fortement basé sur l'amplitude de la frappe (Figure 4.2.24.B).

A contrario, le Cluster 1 semble montrer un contrôle principalement basé sur la durée de frappe (Figure 4.2.18). En effet, par exemple le participant n°37 montre une pente très forte de la relation entre :  $1/(durée\ de\ frappe)^2$  et vitesse optimale du cube, qui signe un contrôle essentiellement basé sur la durée de la frappe (Figure 4.2.20.). De même, les données cinématiques du participant n°37 (Figures 4.2.19.A), montrent une durée beaucoup plus faible du geste pour la condition la plus exigeante (50 cm balsa +10°) que pour la moins exigeante (25 cm alu -10°) s'accompagnant d'une accélération du geste de frappe plus importante dans le premier cas. Si on s'intéresse maintenant à l'ensemble des données de  $Vitesse_{impact}$  en fonction de la  $Durée_{frappe}$  (120 essais) du même participant (Figure 4.2.19B), on constate une relation négative entre les deux variables suggérant que pour augmenter la  $Vitesse_{impact}$  le participant n°37 tend à diminuer la  $Durée_{frappe}$ .

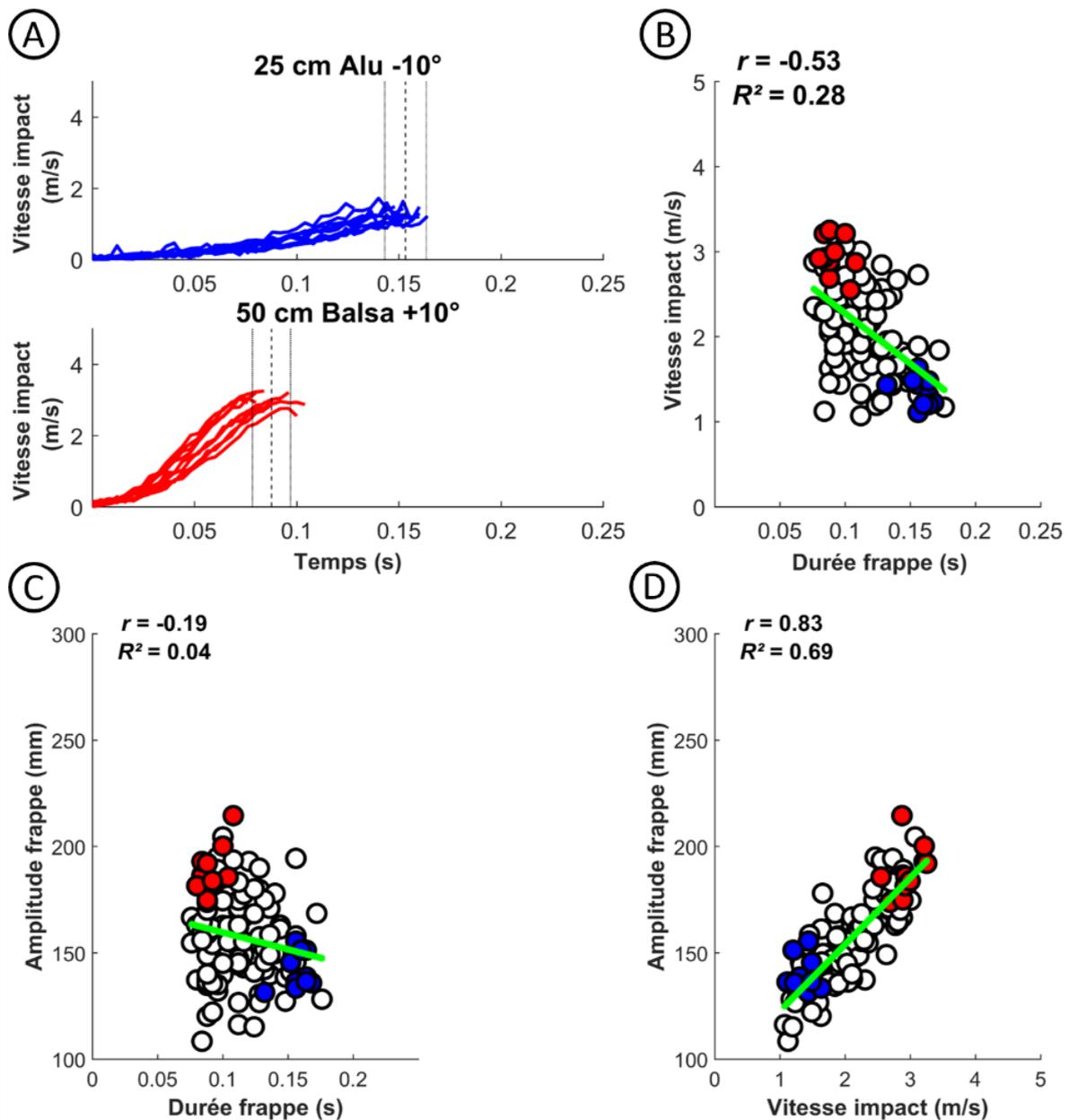
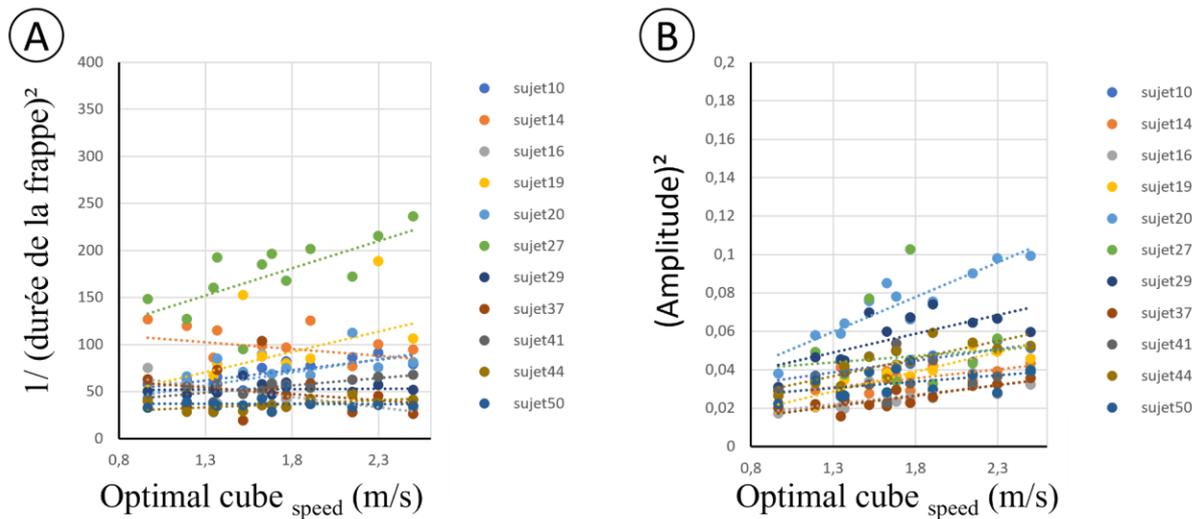
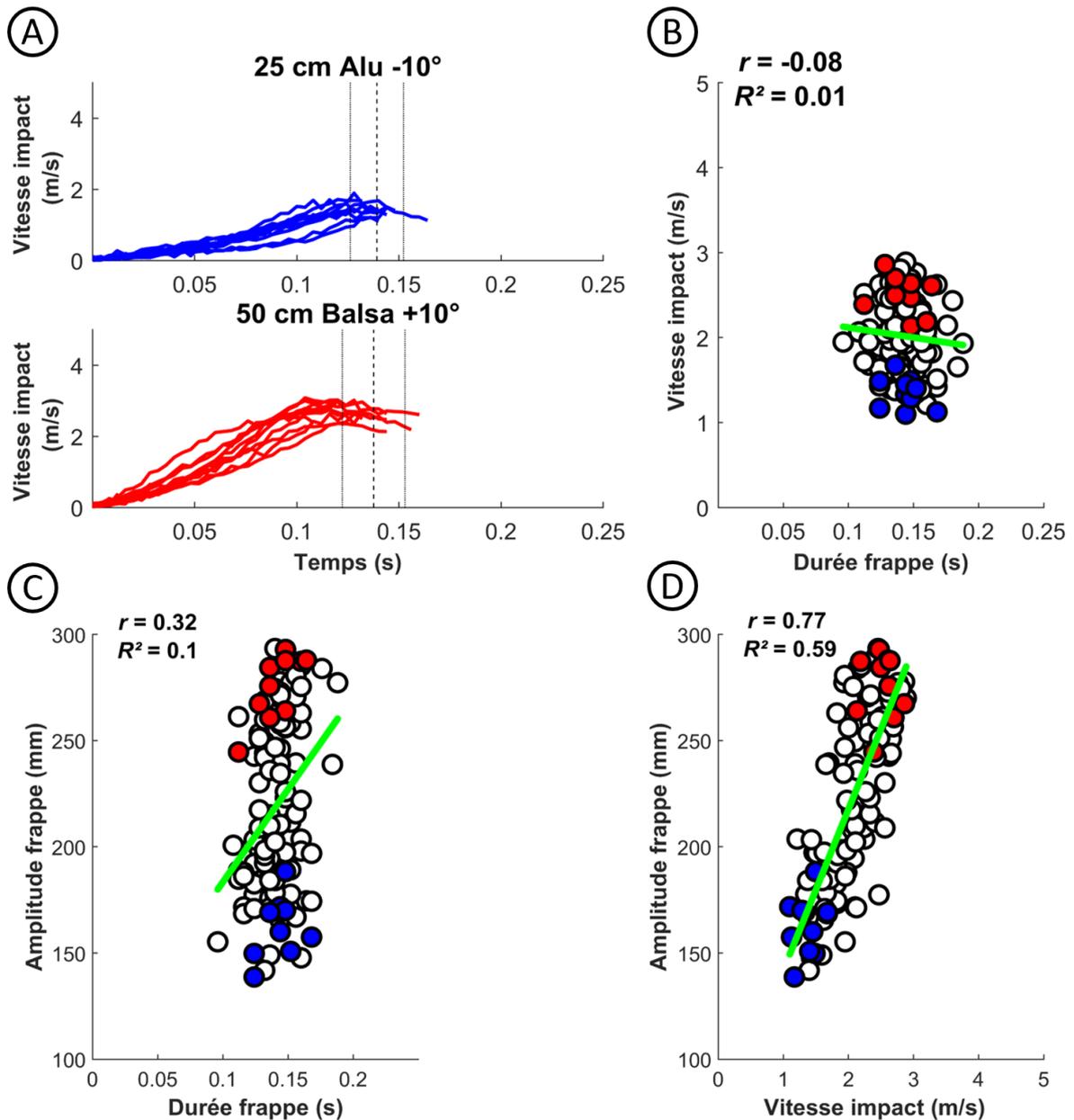


Figure 4.2.19. Illustration du Cluster 1 "Réduction Durée frappe" avec comme exemple les résultats du participant 37 (stratégie avant-bras). A : Tracés de la Vitesse à l'impact en fonction du temps pour les 10 essais dans la condition la moins exigeante (en bleu) et la plus exigeante (en rouge); B : relation entre Vitesse du doigt à l'impact et Durée de la frappe pour l'ensemble des données (120 essais) du même participant avec, en couleur, les données illustrées dans le panneau A; C : relation entre Amplitude de frappe et Durée de la frappe pour l'ensemble des données; D : relation entre Amplitude de frappe et Vitesse du doigt à l'impact pour l'ensemble des données.

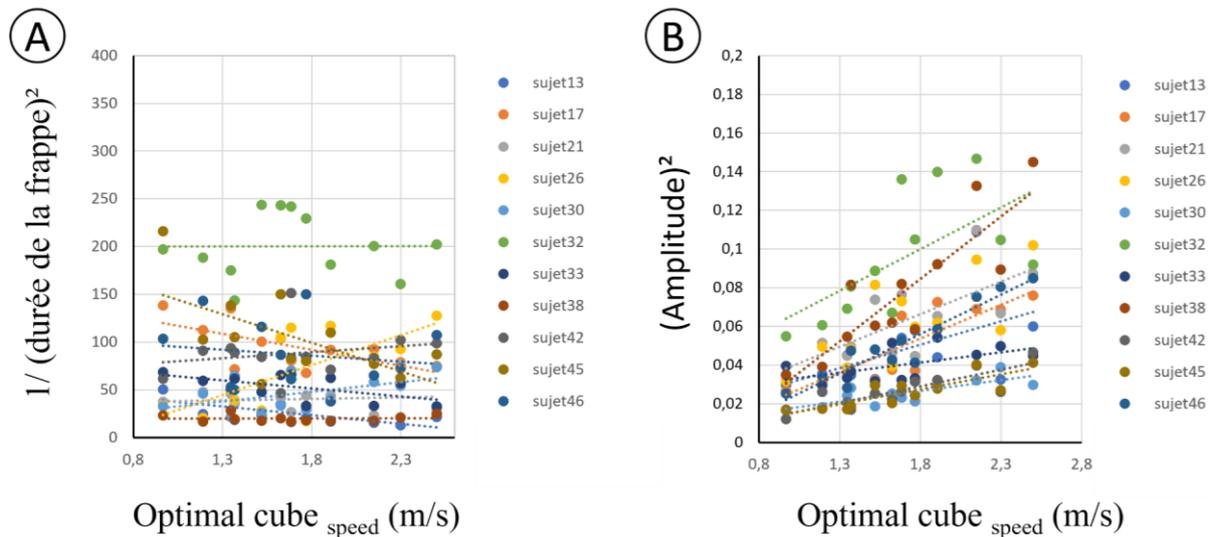


**Figure 4.2.20.** A : variation de la durée de la frappe en fonction de chaque condition (en termes de vitesse optimale du cube) pour l'ensemble des participants de la stratégie "Réduction Durée frappe" ; B: variation de l'amplitude de la frappe en fonction de chaque condition pour ces participants.

En ce qui concerne le Cluster 2, nous avons précédemment mis en évidence une absence totale, en moyenne, de corrélation entre *Vitesse impact* et *Durée frappe* (Figure 4.2.18). C'est également visible au niveau de la variabilité de la relation entre:  $1/(\text{durée de frappe})^2$  et vitesse optimale du cube, tel qu'illustré dans la Figure 4.2.22. La régulation de la *Vitesse impact* dans ce Cluster semble essentiellement se baser sur l'amplitude du geste comme le suggèrent les pentes plus importantes (comparativement au Cluster 1) pour la relation entre  $\text{Amplitude frappe}^2$  et vitesse optimale du cube (Figure 4.2.22.). Les données cinématiques du participant n°17 (Figure 4.2.21) vont également dans le même sens d'un contrôle de *Vitesse impact* essentiellement basé sur l'amplitude du geste.

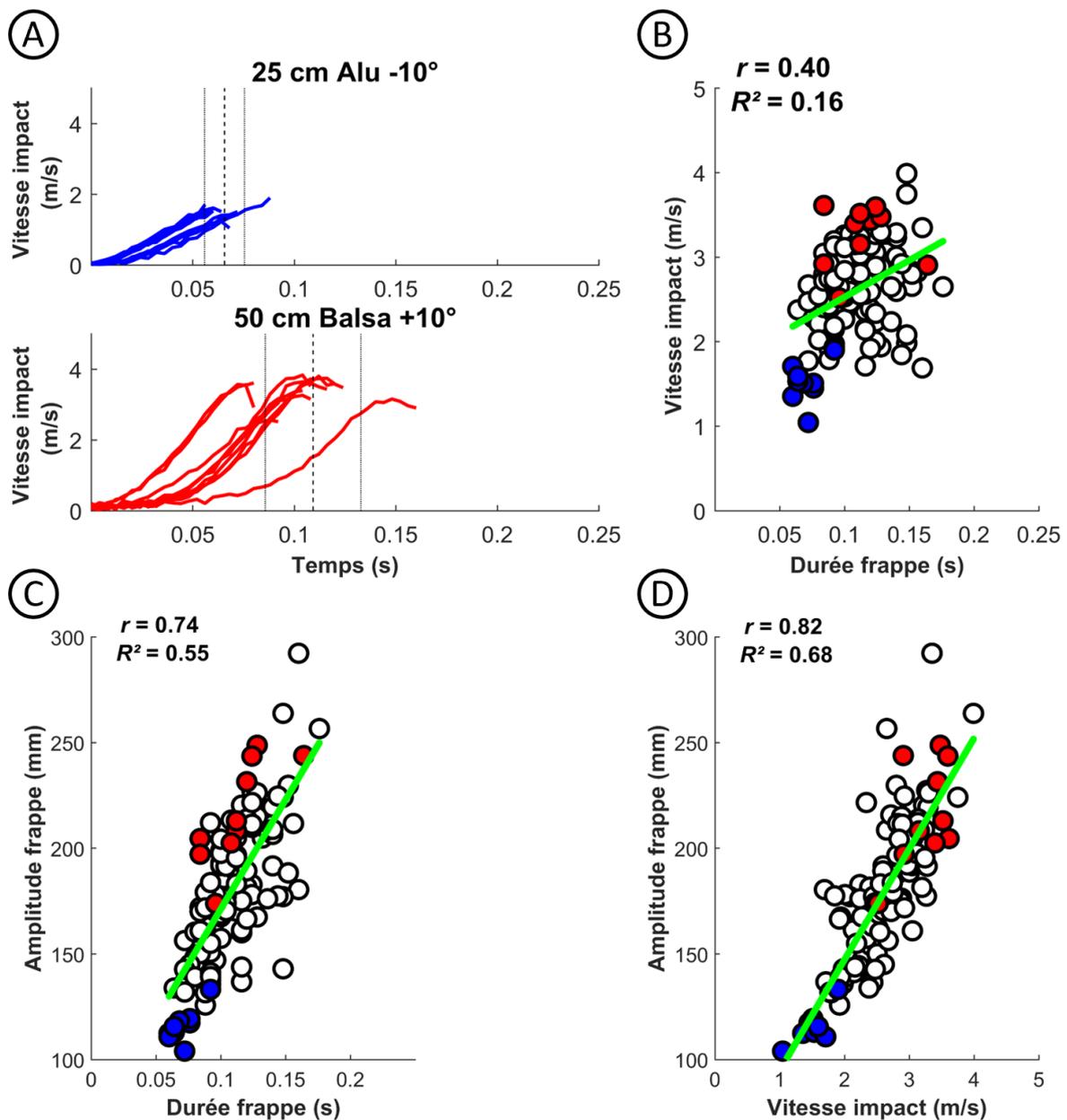


**Figure 4.2.21. Illustration du Cluster 2 “Durée constante  $_{frappe}$ ” avec comme exemple les résultats du participant 17 (stratégie avant-bras). A :** Tracés de la Vitesse à l’impact en fonction du temps pour les 10 essais dans la condition la moins exigeante (en bleu) et la plus exigeante (en rouge); **B :** relation entre Vitesse du doigt à l’impact et Durée de la frappe pour l’ensemble des données (120 essais) du même participant avec, en couleur, les données illustrées dans le panneau A; **C :** relation entre Amplitude de frappe et Durée de la frappe pour l’ensemble des données; **D :** relation entre Amplitude de frappe et Vitesse du doigt à l’impact pour l’ensemble des données.



**Figure 4.2.22.** A : variation de la durée de la frappe en fonction de chaque condition (en termes de vitesse optimale du cube) pour l'ensemble des participants de la stratégie "Durée constante frappe" ; B: variation de l'amplitude de la frappe en fonction de chaque condition pour ces participants.

Enfin, le Cluster 3 se distingue surtout par une relation en moyenne positive à la fois entre *Vitesse impact*, et *Durée frappe*, et entre *Vitesse impact* et *Amplitude frappe* (Figure 4.2.18). C'est également visible dans la présence d'un nombre beaucoup plus important (comparativement aux deux autres Clusters) de pentes négatives dans la variabilité de la relation entre :  $1/(\text{durée de frappe})^2$  et vitesse optimale du cube, tel qu'illustré dans la Figure 4.2.24. De prime abord, cela peut sembler curieux de donner plus de vitesse à l'effecteur terminal (doigt) en augmentant l'amplitude et la durée du geste, mais, en fait, en examinant les données cinématiques du participant n°35 (Figure 4.2.23) on comprend que ce Cluster 3 joue essentiellement sur l'accélération de la phase de frappe qui est beaucoup plus forte (augmentation plus rapide de la *Vitesse impact*) dans la condition la plus exigeante (*50 cm balsa +10°*) que pour celle la moins exigeante (*25 cm alu -10°*). En conséquence de quoi, le Cluster 3 aurait aussi bien pu s'appeler stratégie "amplitude et accélération".



**Figure 4.2.23. Illustration du Cluster 3 “Augmentation amplitude frappe” avec comme exemple les résultats du participant 35 (stratégie poignet).** A : Tracés de la Vitesse à l’impact en fonction du temps pour les 10 essais dans la condition la moins exigeante (en bleu) et la plus exigeante (en rouge); B : relation entre Vitesse du doigt à l’impact et Durée de la frappe pour l’ensemble des données (120 essais) du même participant avec, en couleur, les données illustrées dans le panneau A; C : relation entre Amplitude de frappe et Durée de la frappe pour l’ensemble des données; D : relation entre Amplitude de frappe et Vitesse du doigt à l’impact pour l’ensemble des données.

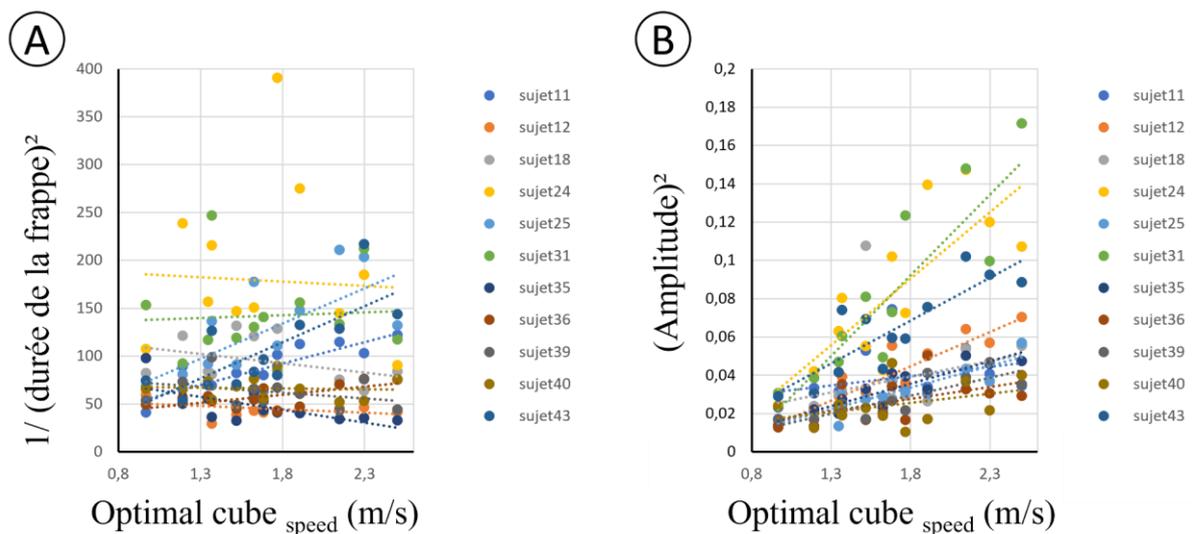


Figure 4.2.24. A : variation de la durée de la frappe en fonction de chaque condition (en termes de vitesse optimale du cube) pour l'ensemble des participants de la stratégie "Augmentation amplitude frappe" ; B : variation de l'amplitude de la frappe en fonction de chaque condition pour ces participants.

En examinant la fréquence de telle ou telle stratégie spatio-temporelle dans chaque groupe de stratégie motrice, il s'avère que ces différentes stratégies sont indépendantes. En effet, si on regarde la répartition des stratégies motrices au sein de chaque Cluster de stratégie spatio-temporelle, on observe une répartition proportionnellement similaire en termes d'individus pour les deux stratégies motrices (Tableau 4.2.6.).

|                             | Cluster 1 :<br>Réduction durée | Cluster 2 :<br>Durée constante | Cluster 3 :<br>Augmentation amplitude | Total participants |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Stratégie <i>poignet</i>    | 4                              | 5                              | 5                                     | 14                 |
| Stratégie <i>avant-bras</i> | 7                              | 6                              | 6                                     | 19                 |

Tableau 4.2.6. Nombre de participants de chaque stratégie motrice en fonction des Clusters de stratégies spatio-temporelles.

On aboutit à la conclusion qu'il existe différentes stratégies de contrôle spatio-temporelles pour frapper le cube. De plus, les stratégies spatio-temporelles et de coordinations motrices sont indépendantes pour expliquer la performance car les trois stratégies spatio-temporelles sont représentées de façon équivalente dans les deux groupes de stratégies motrices (stratégie poignet et stratégie avant-bras).

## 4.2.4. Discussion

### 4.2.4.1 Modèle interne de la friction ( $\mu$ *subjectif*)

Comme indiqué précédemment, notre **première hypothèse** suppose que les participants vont, dans un premier temps, calibrer leur modèle interne subjectif de la friction ( $\mu$  *subjectif*) dans la condition de référence à  $0^\circ$  quand ils découvrent une surface. Par la suite, ils pourront généraliser ce  $\mu$  *subjectif* à d'autres conditions expérimentales ayant la même surface.

Nous avons constaté que, lors du premier essai de la condition initiale à  $0^\circ$  (surface horizontale), les participants transmettent une vitesse initiale similaire au cube, quel que soit le matériau de surface (aluminium et balsa), ce qui conduit à une erreur spatiale négative dans les deux cas (arrêt avant la cible) ; erreur encore plus importante pour le matériau de surface ayant un  $\mu$  plus élevé (voir Figures 4.2.4, 4.2.6 et 4.2.7), à savoir le bois de balsa. Nous supposons que la stratégie de conserver une vitesse constante du cube entre les matériaux pour le premier essai aide à calibrer le  $\mu$  *subjectif* (à partir des conséquences visuelles de la cinématique du cube et du retour haptique), ce qui facilite, à l'essai suivant, la paramétrisation du mouvement afin de réduire l'erreur spatiale. Les conséquences de cette paramétrisation pour diminuer l'erreur spatiale se traduisent par des courbes d'adaptation marquées par une amélioration de la performance au cours des essais grâce à l'augmentation de la vitesse initiale du cube (voir Figures 4.2.3, 4.2.6 et 4.2.7 pour la condition  $0^\circ$ ). En conséquence, au bout de dix essais, le cerveau semble avoir convergé vers une première approximation du  $\mu$  *subjectif* (reflétée au dernier essai par une absence de différence significative à 0% de l'erreur spatiale avec le critère de Bonferroni).

Lorsque l'on regarde l'effet du changement d'inclinaison de la surface, en particulier pour le passage de  $0^\circ$  à  $-10^\circ$  (Figure 4.2.3), les données au premier essai pour la condition  $-10^\circ$  montrent une absence de différence par rapport à 0% d'erreur spatiale, ce qui permet de conclure à une assez bonne performance sans signe d'adaptation. De plus, une autre preuve de la calibration du  $\mu$  *subjectif* (modèle interne du coefficient de friction) est fournie par la diminution significative appropriée de la vitesse moyenne du cube lors de l'essai initial à  $-10^\circ$  par rapport à l'essai final à  $0^\circ$ . Ces résultats se retrouvent également dans la transition de blocs à la fois pour 25 cm et 50 cm (Figure 4.2.6) pour l'ordre " $0^\circ, -10^\circ, +10^\circ$ ". Pour le passage de  $0^\circ$  à  $+10^\circ$ , on observe aussi une certaine généralisation du  $\mu$  *subjectif* en particulier pour le balsa (Figure 4.2.4) que ce soit pour 25 cm ou 50 cm (Figure 4.2.7). Pour l'aluminium, la

généralisation sur la base du  $\mu$  *subjectif* est possible quand les contraintes sont moins fortes à 25 cm, alors qu'elle semble nécessiter à 50 cm une recalibration avec plus d'essais lorsque les difficultés liées à la tâche augmentent.

Bien que nous soyons d'accord avec Hadjiosif et al. (2021) sur le fait que l'adaptation motrice à l'intérieur d'un bloc ne nécessite pas la mise à jour d'un modèle interne, nos résultats fournissent tout de même certains éléments en faveur de la présence de ce modèle interne. En effet, lorsqu'une propriété physique, telle que la pente de la surface, est modifiée entre les blocs, les participants arrivent à re-paramétrer leur mouvement de manière appropriée pour atteindre directement une performance optimale. D'une part, on peut remarquer que les performances ne sont pas toujours optimales après un changement de bloc (exemple la transition de  $-10^\circ$  à  $+10^\circ$  pour l'ordre de lancer " $0^\circ, -10^\circ, +10^\circ$ "), ce qui suggère que la mise à jour du modèle interne pour le contrôle prédictif du mouvement se fait en parallèle et indépendamment des mécanismes qui sous-tendent l'ajustement du mouvement basé sur l'erreur spatiale à travers les essais d'un bloc donné (Hadjiosif et al., 2021). D'autre part, les participants ont aussi montré une performance optimale dès le premier essai d'un bloc malgré un changement simultané des propriétés physiques tel que l'inclinaison de la surface, le matériau de la surface et la distance de la cible (Figure 4.2.8). Ces résultats suggèrent que le changement adéquat de la vitesse initiale du cube lors du premier essai de ce nouveau bloc résulte d'une reparamétrisation du mouvement basée sur un modèle prédictif où les participants auraient calibré leur  $\mu$  *subjectif* pour un matériau donné de surface au cours des essais effectués lors des blocs précédents avec une distance cible différente (voir Tableau 4.2.1, où les essais pour les trois premiers blocs sont effectués avec la même surface). Le seul cas d'échec de la reparamétrisation du mouvement est intervenu lors de la transition la plus exigeante (voir Figure 4.2.8) nécessitant une augmentation d'environ 120% de la vitesse initiale du cube (voir Tableau 2, de 0.967 m/s pour la distance cible de 25 cm sur la surface en aluminium à  $-10^\circ$ , et de 2.147 m/s pour la distance cible de 50 cm sur la surface en balsa de  $0^\circ$ ). Dans ce cas, les participants ont sous-estimé l'importance de la friction pour cette augmentation de distance cible, même s'ils ont augmenté la vitesse à l'impact.

Pour conclure, nos résultats viennent conforter notre hypothèse initiale car l'analyse de l'erreur spatiale et de la vitesse de l'objet à l'impact suggèrent que : 1) les participants ont choisi d'appliquer une vitesse similaire à l'objet lors du premier essai, quel que soit le matériau de la surface, afin de pouvoir faciliter l'estimation du coefficient de friction ; 2) au fil des répétitions,

le mouvement est paramétré afin de réduire l'erreur spatiale ; 3) un modèle interne de friction peut être généralisé lorsque les conditions changent si les contraintes physiques de la tâche ne sont pas trop élevées.

#### 4.2.4.2 Coordination motrice

Le principal défi pour le cerveau est de contrôler les mouvements de frappe en fonction de l'exigence des contraintes de la tâche. Nous avons formulé une **seconde hypothèse** selon laquelle il existerait deux grands types de stratégies motrices, l'une mobilisant principalement la rotation de l'avant-bras et l'autre celle du poignet.

Dans cette étude, nous avons examiné la variabilité interindividuelle dans la paramétrisation du mouvement de frappe en analysant l'amplitude angulaire des articulations de l'avant-bras, du poignet et de l'index. L'erreur spatiale fournit un signal d'erreur sensoriel qui entraîne une régulation de la posture du bras et de l'amplitude angulaire de manière prédictive afin de transmettre au cube la vitesse requise. L'idée est que le cerveau se sert de la redondance motrice intrinsèque (Bernshteïn, 1967; Sternad, 2018) pour ajuster le mouvement afin d'atteindre une distance cible en fonction de l'augmentation de la contrainte de la tâche ; cette dernière se caractérise par un continuum de vitesse optimale du cube impliquant les différents paramètres expérimentaux (Tableau 4.2.2). Pour identifier la variabilité interindividuelle de la coordination motrice, nous avons choisi une analyse par clustering sur l'amplitude angulaire pour les articulations d'intérêt, en fonction des différentes conditions. L'analyse de ces amplitudes angulaires a montré une contribution majoritaire des segments de l'avant-bras et de la main lors du mouvement de frappe, plutôt que la rotation de l'index à lui seul. Cela est logique étant donné que, contrairement au doigt, ces segments corporels peuvent fournir une masse suffisante pour atteindre les valeurs d' $EC_{Totale}$  requises afin d'obtenir la vitesse optimale du cube dans les différentes conditions expérimentales.

Pour conclure, on remarque que la stratégie dite "stratégie poignet" sollicite majoritairement la rotation du poignet tandis que la "stratégie avant-bras" est une combinaison de la rotation de l'avant-bras et du poignet. Au niveau distal, la cinématique du bout du doigt reflète également la variabilité interindividuelle de la masse de segment mise en mouvement (voir Figure 4.2.11).

#### 4.2.4.3 Régulation de l'énergie cinétique

Pour atteindre la cible à une distance donnée, malgré la variabilité motrice, les participants doivent contrôler une certaine variable physique pour transmettre au cube la même vitesse initiale. C'est pourquoi nous supposons (**hypothèse 3**) que les participants transmettent la même quantité d'énergie cinétique totale au cube quelle que soit la stratégie motrice, mais que la valeur d'énergie cinétique associée aux segments corporels de l'avant-bras ou de la main est différente en fonction de la stratégie motrice utilisée. Nous avons cherché également à comprendre comment le contrôle de l'énergie cinétique varie en fonction des contraintes de la tâche.

De manière à atteindre des niveaux similaires d' $EC_{\text{Cube}}$  en fonction de la vitesse optimale du cube, les participants du groupe *stratégie poignet* ont augmenté l' $EC_{\text{Main}}$  pour compenser l' $EC$  inférieure de l'avant-bras par rapport à ceux utilisant la *stratégie avant-bras*. Cette augmentation de l' $EC_{\text{Main}}$  dans la stratégie poignet s'est traduite par une plus grande amplitude angulaire du poignet entraînant une vitesse plus importante du doigt à l'impact (voir Figures 4.2.11 et 4.2.13) par rapport à l'autre stratégie motrice. Ainsi, ces différences de groupe suggèrent que la redondance motrice intrinsèque permet une variabilité individuelle dans la paramétrisation du mouvement grâce aux synergies musculaires sous-jacentes. Ces résultats concernant le contrôle de l'énergie cinétique des membres supérieurs par le cerveau font écho à la littérature sur la taille de la pierre avec un marteau. Il a été démontré que lors de l'utilisation de marteaux ayant des masses différentes pour fractionner la pierre et obtenir des éclats de pierre de la même taille, les participants contrôlent la quantité d'énergie cinétique pour obtenir la même performance (Bril et al, 2010). En lien avec nos résultats, cette littérature suggère que le cerveau prend en compte des variables cinétiques pour paramétrer le mouvement, que celles-ci proviennent d'un membre du corps ou de l'environnement avec lequel nous interagissons. Par ailleurs, d'autres analyses sur la tâche de frappe avec un marteau (Biryukova et al., 2015; Biryukova & Bril, 2008) montrent que les participants experts ont une plus grande flexibilité de la cinématique du mouvement par rapport aux novices. Dans notre expérience, les analyses de régressions multiples suggèrent que lorsque les conditions sont faciles (25 cm alu), il n'y a pas de distinction dans la régulation du mouvement entre les deux stratégies motrices qui sollicitent l' $EC_{\text{Main}}$ . Avec l'augmentation des contraintes, les participants de la stratégie avant-bras ajoutent de la variabilité dans la régulation du mouvement en ajoutant un degré de liberté par la régulation de l' $EC_{\text{Avant-bras}}$  en plus de l' $EC_{\text{Main}}$ . La régulation du mouvement avec deux

segments corporels paraît plus stable (mêmes prédicteurs de performance sollicités malgré l'augmentation des contraintes, cf. Tableau 4.2.2) dans les conditions les plus extrêmes (50 cm Balsa), contrairement à la stratégie poignet qui semble arriver à la limite de sa capacité pour réguler la performance avec l' $EC_{Main}$  et semble tester d'autres combinaisons (différents prédicteurs sollicités malgré l'augmentation des contraintes, cf. Tableau 4.2.2).

Pour conclure, l'analyse biomécanique a montré que malgré une variabilité interindividuelle dans le recrutement des segments du membre supérieur, les participants ajustent la vitesse du bout du doigt à l'impact afin de transmettre l'énergie cinétique nécessaire pour faire glisser l'objet à la distance cible. Lorsque les participants découvrent la tâche ayant des conditions peu contraignantes, ils limitent l'utilisation des degrés de liberté corporels. Ce n'est qu'avec la pratique et l'augmentation des contraintes que certains participants vont ajouter des degrés de liberté supplémentaires, ce qui va aboutir à l'émergence d'un nouveau type de stratégie motrice.

#### 4.2.4.4 Régulation des paramètres cinématiques à l'impact

Nous avons cherché à comprendre comment dans les deux stratégies motrices certains paramètres cinématiques influent sur la performance au moment de l'impact, en reprenant le cadre interprétatif de Sternad (2018) comme illustré dans la Figure 4.2.25. ci-après. Tout d'abord, la *redondance intrinsèque* est caractérisée ici par les stratégies motrices avant-bras et poignet. Par ailleurs, dans notre cas, la *redondance extrinsèque* regroupe les paramètres liés à la trajectoire du bout de l'index jusqu'au moment de l'impact. Pour les deux groupes de stratégie motrice, le meilleur déterminant de la performance est la vitesse de l'index avant impact  $V_{f \text{ impact}}$  ; cela rejoint certains travaux sur des tâches de frappe qui montrent que la vitesse à l'impact est très stable chez les artisans tailleurs de pierre (Biryukova & Bril, 2008). Par contre, dans notre étude, les deux groupes semblent se distinguer pour le contrôle de la trajectoire d'approche de la phalange ( $\alpha_{f \text{ trajectory}}$ ) et l'angle de l'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_{f \text{ impact}}$ ). La trajectoire d'approche de la phalange ( $\alpha_{f \text{ trajectory}}$ ) a une influence sur la vitesse du cube dans les deux stratégies motrices et son contrôle semble être particulièrement nécessaire pour le groupe *stratégie avant-bras* avec une trajectoire d'approche de plus en plus perpendiculaire au cube (de façon à minimiser les frottements avec les parois de la gouttière) en fonction de l'augmentation des contraintes expérimentales. Le contrôle de l'angle de l'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_{f \text{ impact}}$ ), quant à lui, a une influence positive sur la vitesse du cube ; en particulier dans le groupe *stratégie poignet* où les participants augmentent

l'inclinaison de la phalange pour que le doigt soit plus perpendiculaire au cube à l'impact, surtout quand les contraintes de la tâche augmentent. De la même façon, Bril et collaborateurs (2012) mettent en avant qu'en fonction du type d'éclat de roche recherché, les tailleurs de pierre adaptent leur mouvement pour contrôler à l'impact l'angle du marteau formé avec la pierre. Enfin, en ce qui concerne la *redondance liée à la tâche* (Sternad, 2018), il semblerait que, pour les deux stratégies motrices, le contrôle de l'écart entre le bout du doigt à l'impact et le centre de la cible ( $\epsilon_{f \text{ impact}}$ ) ne soit pas déterminant pour la régulation de la vitesse du cube.

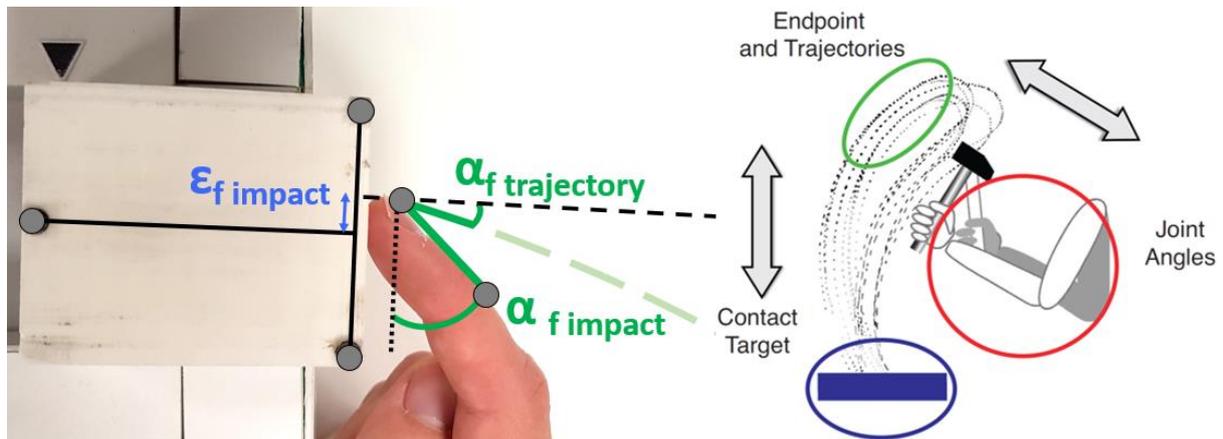


Figure 4.2.25. Contrôle des paramètres cinématiques à l'impact dans notre expérience (à gauche) d'après la terminologie de Sternad 2018 (à droite), avec la redondance extrinsèque en vert et la redondance liée à la tâche en bleu.

#### 4.2.4.5 Stratégies spatio-temporelles du contrôle de la frappe

Notre dernière hypothèse (**hypothèse 4**) porte sur le contrôle spatio-temporel de la frappe pour lequel nous avons supposé que les participants contrôleraient majoritairement l'amplitude du geste en gardant relativement invariant le temps de mouvement pour contrôler la vitesse à l'impact. Nos résultats viennent infirmer cette hypothèse en mettant en évidence trois types de contrôles spatio-temporels. En effet, l'analyse de corrélations des variables *Durée frappe*, *Vitesse impact*, et *Amplitude frappe* (Tableau 4.2.5), a conduit à isoler trois Clusters. Le Cluster 1 regroupe les participants qui contrôlent principalement la durée de frappe pour faire varier la vitesse à l'impact. Ils font peu varier l'amplitude mais vont surtout réduire le temps de mouvement pour augmenter la vitesse à l'impact. Pour le Cluster 2, les participants font peu varier le temps de frappe mais vont surtout augmenter l'amplitude de frappe pour contrôler la vitesse à l'impact. Enfin, pour le Cluster 3, les participants varient l'amplitude et la durée du mouvement en se focalisant sur l'accélération durant la phase de frappe. Nous pouvons noter que pour contrôler

la vitesse à l'impact en fonction de la durée de la frappe et de l'amplitude de frappe, les Clusters 1 et 2 font varier l'un des paramètres spatio-temporels en gardant l'autre invariant tandis que le Cluster 3 fait conjointement varier les deux paramètres. On observe aussi qu'il n'y a pas de lien entre les stratégies spatio-temporelles et les stratégies de coordinations motrices. Les Clusters 2 et 3 ont montré un contrôle de la vitesse à l'impact basé sur l'amplitude du geste, on pourrait donc s'attendre à avoir plus de participants utilisant la *stratégie avant-bras* car ils ont une plus grande amplitude pour réguler leurs mouvements, mais on retrouve, proportionnellement, le même nombre de participants de chaque stratégie motrice dans les stratégies spatio-temporelles.

Dans notre expérience, le contrôle de la durée de la frappe (Cluster 1) rappelle par certains aspects l'étude de la variabilité inter-individuelle dans le contrôle spatio-temporel de la frappe dans le swing au baseball, dans l'ouvrage de Schmidt & Debû (1993, p.117). Même si le temps total du mouvement de swing est relativement similaire entre les novices et les experts, ces derniers déclenchent leurs mouvements plus tard par rapport aux novices. L'hypothèse est que les experts prendraient plus de temps pour prendre en compte les informations de la trajectoire de la balle avant de frapper la balle avec une durée de mouvement plus courte. Quant à la régulation observée dans les Clusters 2 et 3, elle rappelle les résultats de l'étude de Craig et al. (2000) portant sur le putting au golf qui montre que le mouvement de la tête du club est mis à l'échelle spatialement et régulé perceptivement en le couplant à un guide temporel intrinsèque (intrinsic tau guide, en anglais) généré dans le système nerveux. L'idée générale est qu'il faut coordonner et réguler la vitesse de fermeture d'un écart de mouvement (motion gap, en anglais), tel que l'écart entre le club et la balle, sur la base d'un couplage du mouvement avec ce guide intrinsèque. Craig et al. (2000) ont ainsi mis en évidence une régulation de la vitesse (au carré) du club à l'impact en fonction de la distance du put. De plus, la mise à l'échelle spatiale du geste est faite essentiellement en ajustant  $D^2$  (distance totale du mouvement au carré).

En résumé, nous avons mis en évidence trois stratégies de contrôle spatio-temporel du geste balistique de frappe dans notre étude : soit en régulant la durée de frappe (en gardant l'amplitude constante) ; soit en régulant l'amplitude du geste (en gardant la durée de frappe constante) ; soit en régulant à la fois la durée de frappe et l'amplitude de la frappe. Par ailleurs, les stratégies spatio-temporelles de contrôle du mouvement et le choix de la coordination motrice utilisée s'avèrent être indépendants.

## 5. Discussion générale

Lorsqu'un objet doit glisser sur une surface jusqu'à une distance cible, la vitesse optimale initiale de l'objet après impact est le paramètre physique crucial à contrôler. Cette vitesse optimale du cube dépend de la distance à atteindre, du coefficient de friction cinétique  $\mu_c$ , ainsi que de l'inclinaison de la surface. L'erreur spatiale est la conséquence de l'influence de différents paramètres physiques dont, en particulier, la friction qui agit sur la dynamique de l'objet une fois qu'on lui a transmis une vitesse initiale en le ralentissant progressivement jusqu'à ce qu'il s'arrête. Les participants ayant pour consigne d'atteindre la cible, cette erreur spatiale nous renseigne directement sur l'estimation que le cerveau se fait de la friction entre deux surfaces pour une condition donnée. Pour rappel, la question fondamentale de cette thèse est de comprendre le rôle d'un modèle interne de la friction pour paramétrer un geste balistique de frappe afin d'envoyer un objet à une distance donnée. Au travers de deux expériences, nous avons fait l'hypothèse que, pour atteindre une distance cible, les participants doivent calibrer, dans un premier temps, leur modèle interne de la friction ( $\mu_{subjectif}$ ) pour une surface donnée, afin de minimiser d'entrée de jeu l'erreur spatiale au bloc suivant (lorsque l'on change les conditions de distance cible ou d'inclinaison de la surface) en donnant à l'objet la vitesse initiale appropriée (sur la base de ce  $\mu_{subjectif}$ ). Cette vitesse initiale résulte d'un contrôle de l'énergie cinétique transmise au cube malgré une variabilité inter-individuelle des coordinations motrices et des stratégies spatio-temporelles utilisées dans le mouvement balistique de frappe.

### 5.1 Modèle interne de la friction

La littérature scientifique montre que nous avons tendance à faire des erreurs d'estimation de la valeur exacte du coefficient de frottement lorsque nous devons juger visuellement l'interaction entre une surface et un objet (Hecht, 2015). En effet, nous nous laissons parfois influencer par le rendu visuel de la texture des surfaces plus ou moins brillantes, en associant brillant et glissant (Joh et al., 2006). Nos données suggèrent que sur la seule base des informations visuelles au premier essai, nous avons tendance à sous-estimer le coefficient de frottement lorsque nous découvrons pour la première fois les surfaces à l'horizontale, comme le montre l'erreur spatiale initiale négative au premier essai. En effet, l'erreur spatiale commise par les participants nous renseigne sur le modèle interne de la friction ( $\mu_{subjectif}$ ) de ces derniers. Quand on intègre l'Équation 2.3.3 pour passer de l'accélération à la position, on

observe que le coefficient de frottement cinétique  $\mu_c$  dépend de la vitesse du cube à l'impact (Cube Speed<sub>impact</sub> Équation 5.1.) et de la distance  $d$  parcourue par l'objet :

$$\mu_c = \frac{\left(\frac{\text{Cube Speed}_{\text{impact}}^2}{2dg}\right) - \sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} \quad \text{Équation 5.1.}$$

Si nous devons estimer la valeur du  $\mu$  *subjectif* pour un essai donné, il faudrait utiliser la distance cible  $d$  ainsi que la vitesse du cube à l'impact car le participant transmet une vitesse initiale donnée au cube en supposant qu'il glissera jusqu'à la distance cible. Après avoir frappé l'objet, la valeur objective de  $\mu_c$  serait calculée en utilisant la distance réelle parcourue par le cube à l'essai donné. Par conséquent, la valeur du  $\mu$  *subjectif* se reflète dans le rapport entre la distance parcourue par le cube et la distance cible. Ce rapport de distance met en avant l'importance de l'erreur spatiale dans l'estimation de la friction (Équation 5.2.). Pour pouvoir envoyer un objet à une distance cible, comme au curling, il faut prendre en considération la distance de la cible, ce qui suppose une représentation interne de la position des objets dans notre environnement (Land, 2014). Par ailleurs, notre raisonnement repose sur l'hypothèse que nous disposons d'un "assez bon" modèle interne de la gravité (McIntyre et al., 2003). Si le modèle interne de gravité des participants est erroné, le cerveau devra résoudre l'Équation 5.2. avec deux facteurs inconnus, à savoir  $\mu$  et  $g$ . Toutefois, le contrôle moteur du geste pour atteindre la cible peut être réalisé à partir du moment où la valeur subjective de la gravité ( $g$ ) est constante (hypothèse raisonnable). Si la valeur subjective de gravité est supérieure à 9.81 m/s<sup>2</sup>, alors la valeur subjective de  $\mu$  sera inférieure à la valeur réelle de  $\mu$  pour obtenir la vitesse du cube optimale afin d'atteindre la cible. Le cerveau n'aurait ainsi qu'à adapter la valeur du  $\mu$  *subjectif* pour paramétrer le mouvement de manière à obtenir la vitesse initiale requise du cube (Équation 4.2.2).

$$d = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2}{g[\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)]} \quad \text{Équation 5.2.}$$

$$\text{Cube Speed}_{\text{optimal}} = \sqrt{2 g d [\sin(\alpha) + \mu_c \cos(\alpha)]} \quad \text{Équation 4.2.2.}$$

Dans une seconde expérience, nous avons observé qu'au premier essai dans la condition initiale à 0°, les participants transmettent une valeur similaire de vitesse initiale au cube pour les deux matériaux de surface. Il en résulte une plus grande sous-estimation de la friction pour le matériau ayant un  $\mu$  plus important (voir Figures 4.2.6 et 4.2.7), c'est-à-dire le balsa. Ce choix

de maintenir une vitesse initiale similaire du cube, au premier essai, quelle que soit la surface, facilite l'estimation du  $\mu$  *subjectif* et permet à l'essai suivant de re-paramétrer le mouvement dans le but de diminuer l'erreur spatiale. Le  $\mu$  *subjectif* est calibré à partir des conséquences visuelles de la cinématique du cube et de l'erreur spatiale ainsi que par les retours haptiques suite à l'impact. Après le premier essai, cet effet de reparamétrisation du mouvement est observable grâce à des courbes d'adaptation qui montrent une augmentation de la vitesse initiale du cube afin de réduire la sous-estimation pour le balsa et l'aluminium, et ce dans les deux expériences que nous avons effectuées. Ainsi dans nos deux expériences, à la fin des essais de la condition initiale à 0°, les participants semblent avoir convergé vers une première calibration du  $\mu$  *subjectif* pour une surface donnée (caractérisée par une erreur spatiale qui n'est pas significativement différente de zéro au dernier essai dans l'expérience 2). Ces résultats confirment qu'une calibration du  $\mu$  *subjectif* se met en place grâce à la combinaison des entrées sensorielles visuelles et haptiques (Joh et al., 2007).

Dans nos deux expériences, on observe que lorsque le  $\mu$  *subjectif* a été correctement calibré à 0°, ensuite, lors d'un changement de condition de distance cible ou d'inclinaison de la surface, les participants arrivent généralement à une bonne performance (en termes d'erreur spatiale). Celle-ci se caractérise par un ajustement approprié de la vitesse initiale du cube dès le premier essai pour répondre aux contraintes de la tâche, ce qui ne conduit pas à une reparamétrisation de la vitesse après le premier essai.

Dans notre première expérience, on retrouve certaines conclusions avancées par Joh et collaborateurs (2007) dans une tâche d'estimation de notre capacité à rester debout sur des pentes (Figure 2.3.6.). En effet, ces auteurs ont montré que les participants tendent à surestimer leur capacité à s'aventurer sur une surface à faible friction (du vinyle, comme dans notre expérience) et à sous-estimer l'effet de la friction sur une surface dont le coefficient de friction est élevé (dans notre cas il s'agit de l'aluminium et du balsa). Notre première expérience aboutit par ailleurs aux mêmes conclusions que l'étude de Chauvel et collaborateurs (2012) sur le putting au golf qui montre que l'ordre de lancer, d'une distance plus proche vers une distance plus éloignée, génère moins d'erreurs spatiales que l'ordre inverse (analyse présentée en Annexe 7.4 ). C'est cet ordre de lancer (du plus proche au plus éloigné) que nous avons choisi de conserver dans la deuxième expérience.

Dans la deuxième expérience, l'augmentation des essais de familiarisation à 0° permet une amélioration de la performance lors du changement de condition car le  $\mu$  *subjectif* a plus

d'essais pour être mieux calibré (Figure 4.2.4.). En effet, on est passé de 5 à 10 essais ce qui s'accompagne d'une absence d'erreur spatiale significative (par rapport à zéro) au premier essai lors du changement d'inclinaison (excepté pour l'aluminium à +10°, cf. Figure 4.2.4.). L'augmentation de la distance cible entraîne une sous-estimation de la friction pour les surfaces ayant un coefficient de frottement élevé (Figure 4.2.5.) et une reparamétrisation du mouvement.

Dans leur étude, Amorim et collaborateurs (2015) affichaient sur un écran le dispositif de lancement de Michotte (cf. Section 4.2.4.1) où, suite à une collision entre deux objets, les participants devaient indiquer la position où l'objet propulsé aurait dû s'arrêter (supposément à cause de la friction) alors qu'il continuait sa course sur une surface inclinée (dans le plan de l'image) ou horizontale jusqu'à sortir de l'écran. Ils ont montré une cohérence entre le  $\mu$  *subjectif* de la surface horizontale et de celle inclinée vers le haut. Cependant, en descente, la friction était estimée 1,5 fois plus importante. Or, dans notre seconde expérience, le  $\mu$  *subjectif* pour la condition en descente (-10°) est cohérent avec 0° (aucune reparamétrisation du geste n'est observée) et la performance est d'emblée quasiment optimale. Cette différence peut s'expliquer par le fait que dans l'étude d'Amorim et al. (2015), le déplacement de l'objet lancé est uniquement observé sur un écran avec une surface symbolisée par un trait (lorsqu'elle est représentée) qui ne précise pas le type de matériau en contact. Dans notre expérience, c'est pour l'inclinaison à +10° avec l'aluminium que les participants rencontrent des difficultés et doivent re-paramétrer leur geste. En effet, à -10°, il est biomécaniquement plus facile d'ajuster la vitesse à transmettre au cube en la diminuant de manière appropriée sur la base du  $\mu$  *subjectif*, tandis qu'en montée il y a plus de contraintes. A +10°, on peut supposer, pour le balsa, que les participants atteignent en moyenne une vitesse limite d'emblée transmise au cube qui s'avère adaptée à la tâche. Toutefois, pour l'aluminium (la surface ayant un plus faible coefficient de frottement) une reparamétrisation du geste s'avère nécessaire (Figure 4.2.4.).

A la lumière de nos deux expériences, on pourrait se demander si la tâche requiert un modèle interne de la friction pour le contrôle du geste. Certes, on peut réduire l'erreur spatiale d'essai en essai sur la seule base d'une mesure visuelle de l'erreur (Hadjiosif et al., 2021). Dans ce cas, une réadaptation motrice devrait être observée à chaque bloc correspondant à un changement de condition d'inclinaison, de surface, ou de distance. Toutefois, on constate empiriquement que cette réadaptation motrice n'est pas systématiquement observée. Qui plus est, la performance peut s'avérer d'emblée optimale malgré un changement de plusieurs paramètres physiques entre blocs (cf. Figures 4.2.6, 4.2.7 et 4.2.8). En l'occurrence, nos données plaident

plutôt en faveur d'une régulation du mouvement sur la base d'un modèle interne de la friction calibré au cours des essais initiaux à 0° pour une surface donnée.

## 5.2 Variabilité motrice dans la paramétrisation du mouvement en fonction de la friction

Contrôler les mouvements de frappe afin qu'un objet glisse jusqu'à une cible dépend des contraintes de la tâche. En effet, nous avons constaté une régulation linéaire de l' $EC_{\text{Cube}}$  en fonction de la vitesse optimale du cube qui permettrait d'atteindre la meilleure performance (Figure 4.2.13.). L' $EC_{\text{Cube}}$  ne représente qu'environ 10% de l' $EC_{\text{Total}}$  (les autres 90% sont associés au mouvement du bras qui continue sa course), cette dernière résulte de la somme de l' $EC$  des segments corporels pouvant transmettre suffisamment d' $EC$ , c'est-à-dire  $EC_{\text{Avant-bras}}$  et  $EC_{\text{Main}}$ . La régulation de l' $EC_{\text{Cube}}$  est la conséquence de la régulation linéaire des amplitudes angulaires de l'avant-bras et du poignet en fonction de la vitesse optimale du cube (Figure 4.2.10.). Ce contrôle de l'amplitude angulaire des segments corporels correspond bien à la littérature relative au contrôle postural/angulaire du bras (Albert et al., 2020). A l'instar des modèles d'apprentissage d'erreurs par rétroaction (Kawato, 1999, 2009), nous suggérons que l'erreur spatiale fournit un signal d'erreur sensoriel utilisé pour réguler la posture du bras et l'amplitude angulaire de manière prédictive (afin de transmettre la vitesse requise au cube) via des commandes motrices de rétroaction (Wolpert & Kawato, 1998a). Le cortex pariétal et le cervelet seraient les structures cérébrales centrales principalement impliquées dans cette régulation de la perception-action (Blakemore & Sirigu, 2003) et de l'adaptation motrice que nous avons constatée au cours des essais. L'erreur spatiale (mesurée par les régions pariétales) fournirait au cerveau une variable de contrôle afin que le  $\mu$  *subjectif* puisse converger vers la valeur objective du  $\mu$  réel nécessaire pour paramétrer le mouvement de frappe. Cependant, la cinématique du bout du doigt reflète également une certaine variabilité interindividuelle en fonction de la masse totale des segments corporels mis en mouvement (voir Figures 4.2.10. et 4.2.11). De plus, l'index contribue à la performance au travers des paramètres cinématiques d'approche à l'impact ( $\alpha_{f \text{ trajectory}}$  ;  $\alpha_{f \text{ impact}}$ ) en fonction de la vitesse optimale du cube (Figure 4.2.17.).

A la suite de notre première expérience, il est apparu que pour frapper l'objet, les participants adoptent différentes combinaisons de rotations articulaires de l'avant-bras, du poignet et de l'index. C'est pourquoi dans notre seconde expérience, nous sommes allés plus loin et nous

avons cherché à caractériser cette variabilité interindividuelle afin de comprendre comment elle entre en compte dans la paramétrisation du mouvement de frappe, en analysant l'amplitude angulaire. Pour atteindre une distance cible donnée, le cerveau utilise la redondance motrice intrinsèque (Bernshteïn, 1967; Sternad, 2018) en fonction des contraintes croissantes des conditions expérimentales qui correspondent à un continuum de vitesses optimales du cube juste après l'impact. Nos analyses de régression ont montré une relation linéaire entre l' $EC_{Cube}$  et la vitesse optimale du cube suggérant une paramétrisation du mouvement qui tient compte des contraintes de la tâche. Par ailleurs, notre analyse par clustering de l'amplitude angulaire des articulations d'intérêt pour les différentes conditions a permis de caractériser la variabilité interindividuelle de la coordination motrice. Cette analyse a mis en avant l'importance de la rotation des segments corporels de l'avant-bras et de la main car ils ont assez de masse lors du mouvement afin d'atteindre l' $EC_{Totale}$  nécessaire pour que le cube ait une vitesse adaptée pour atteindre la cible. La seule rotation de l'index, même très rapide, n'engage pas suffisamment de masse pour atteindre le niveau d' $EC_{Totale}$  requis. Par conséquent, nous avons limité notre analyse à deux groupes de participants qui montreraient une différence quantitative substantielle dans la paramétrisation du mouvement.

Pour qu'un objet frappé glisse jusqu'à une distance cible, une quantité d'énergie cinétique spécifique doit lui être transmise lors de l'impact. Pour les deux stratégies motrices, les participants ont bien augmenté linéairement l' $EC$  (totale et cube) en fonction de la contrainte de la tâche (vitesse optimale du cube), mais ils diffèrent dans leur comportement au niveau cinématique. La stratégie *avant-bras* se caractérise par une variation similaire de l'amplitude angulaire de l'avant-bras et du poignet en fonction de la vitesse optimale du cube (Figure 4.2.10). En revanche, la stratégie *poignet* montre des valeurs beaucoup plus élevées d'amplitude angulaire du poignet et plus faibles pour l'avant-bras que pour l'autre stratégie motrice. Cette variabilité dans le contrôle de l'amplitude angulaire des segments corporels pour les deux stratégies motrices se retrouve dans la vitesse du bout du doigt à l'impact. Afin d'atteindre des niveaux similaires de  $EC_{Cube}$  en fonction de la vitesse optimale du cube, les participants utilisant la stratégie *poignet* ont augmenté l' $EC_{Main}$  pour compenser l' $EC_{Avant-bras}$  qui était inférieure par rapport à la stratégie *avant-bras*. Cette augmentation de l' $EC_{Main}$  dans la stratégie *poignet* s'est traduite par une plus grande amplitude angulaire du poignet et a entraîné une plus grande vitesse des doigts à l'impact (Figures 4.2.9. et 4.2.11.) par rapport à l'autre stratégie. Cependant, comme la translation de la masse de l'avant-bras entre dans la formule de l' $EC_{Main}$  (Équation 4.2.5.), les deux groupes de stratégie motrice ne diffèrent pas en

termes d' $EC_{Main}$ . En accord avec les études montrant que le cortex moteur peut représenter le mouvement du bras à travers des espaces de paramètres intrinsèques de la cinématique articulaire et des couples articulaires (Scott & Kalaska, 1997), nos résultats suggèrent que l' $EC$  des segments du membre supérieur peut constituer un paramètre contrôlé dans la paramétrisation du mouvement de frappe. De plus, les différences de groupes suggèrent que la redondance motrice permet une variabilité individuelle dans la paramétrisation du mouvement grâce aux synergies musculaires sous-jacentes. L' $EC$  serait un critère d'optimalité pour le cerveau dans la construction du mouvement basé sur des primitives motrices (de type champ de force/synergie musculaire, dans la lignée de Giszter 2015).

Nos résultats sur le contrôle par le cerveau de l'énergie cinétique des membres supérieurs font écho à la littérature sur la taille de la pierre avec un marteau qui montre que lorsque des marteaux de masses différentes sont utilisés pour fractionner la pierre afin d'obtenir des éclats de pierre de même taille, les participants ne contrôlent à l'impact qu'une quantité d'énergie cinétique spécifique similaire pour obtenir la même performance (Bril et al., 2010, 2012). Comme dans nos résultats, cette littérature suggère que le cerveau prend en compte des variables cinématiques pour paramétrer le mouvement, qu'elles proviennent d'un segment corporel ou d'un objet de l'environnement avec lequel nous interagissons. Dans notre étude, nous montrons lorsque les contraintes sont faibles (25 cm aluminium) que les stratégies motrices *avant-bras* et *poignet* recrutent uniquement l' $EC_{Main}$ . Ce n'est qu'ensuite, avec l'augmentation des contraintes, que la stratégie *avant-bras* va ajouter un degré de liberté avec l' $EC_{Avant-bras}$ , permettant ainsi une performance plus stable quand les contraintes sont élevées (50 cm balsa), contrairement à la stratégie *poignet* qui semble être arrivée à la limite de son efficacité. Ces résultats sont cohérents avec la littérature montrant qu'avec la pratique et l'expérience, les participants experts ont plus une grande variabilité de mouvement lors de la taille de pierre (Biryukova et al., 2015; Biryukova & Bril, 2008).

Notre étude s'inscrit dans l'idée que le cerveau possède un "assez bon" modèle interne de la gravité (McIntyre et al., 2003) ; par "assez bon" nous signifions qu'il est fonctionnellement pertinent, bien qu'imparfait. De la même façon, nous avons mis en évidence qu'il existerait un modèle interne de la friction "assez bon" impliqué dans le contrôle du mouvement de frappe quand il faut faire glisser un objet vers une distance cible. De même, en suivant Sternad (2018), nous suggérons que la variabilité de l'erreur spatiale entre les essais (qui est la conséquence de l' $EC_{Cube}$  en fonction de la vitesse optimale du cube), qui s'ajoute ou se substitue au mécanisme

d'adaptation motrice que nous avons observé, refléterait une exploration aléatoire dans la stratégie motrice pour réaliser la tâche. La source de ce "bruit moteur" est intentionnelle (dans le but de réduire l'erreur spatiale), contrairement au bruit physiologique dans les signaux du contrôle neuronal (Harris & Wolpert, 1998) qui peut également ajouter de la variance dans la performance. Les participants apprennent intentionnellement à contrôler les diverses sources de bruit dans la performance, comme l'efficacité de l'EC (le rendement de l'EC entre l'EC<sub>Totale</sub> et l'EC<sub>Cube</sub>), l'orientation de la trajectoire du cube après l'impact (pour éviter ou exploiter les collisions entre le cube et la gouttière), etc... Pour pouvoir exploiter les différentes sources de bruit, le cerveau doit optimiser les paramètres cinématiques du contrôle du mouvement avant l'impact. En effet, les deux stratégies motrices utilisent la redondance intrinsèque présente dans la trajectoire d'impact ( $\alpha_f$  trajectory) et l'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_f$  impact), mais pas de la même manière en fonction des contraintes de la tâche. Le contrôle de la trajectoire d'impact ( $\alpha_f$  trajectory) jouerait un rôle plus prépondérant pour la stratégie *avant-bras* qui semble ajuster la combinaison de la rotation de l'avant-bras et du poignet afin d'obtenir une trajectoire de plus en plus perpendiculaire (et donc plus optimale, car cela minimise les frottements latéraux du cube lors de son déplacement dans la gouttière) en fonction de l'augmentation de la difficulté. L'orientation de la phalange à l'impact ( $\alpha_f$  impact) a besoin d'être de plus en plus perpendiculaire à la face du cube, en particulier pour la stratégie *poignet* ; on peut donc supposer que l'orientation perpendiculaire de la phalange permet de réduire la zone de contact entre le doigt et le cube, et une rigidification du doigt avec l'alignement des phalanges. Pour la redondance liée à la tâche, le paramètre d'écart entre le bout du doigt à l'impact et le centre de la cible ( $\varepsilon_f$  impact), ne semble pas déterminant pour la régulation de la vitesse du cube. Ces différentes sources de variabilité peuvent également expliquer la généralisation partielle du  $\mu$  *subjectif* dans la transition entre certains blocs d'essais.

Le contrôle spatio-temporel du geste se fait sur la base des informations sensorielles et de façon prédictive, en ajustant les paramètres de frappe pour donner au cube la vitesse initiale nécessaire pour atteindre la cible. Pour cela, les participants peuvent notamment faire varier la durée de mouvement ou l'amplitude du geste (Schmidt & Debû, 1993). A cet effet, ils peuvent choisir de garder un paramètre invariant (durée ou amplitude), tout en gardant l'autre constant. Dans notre deuxième étude, les participants du Cluster 1 gardent l'amplitude du geste relativement invariante et contrôlent la vitesse à l'impact en faisant varier le temps de mouvement. L'étude de Craig et al. (2000) sur le putting au golf montre que le mouvement de la tête du club est mis à l'échelle spatialement et régulé perceptivement en le couplant à un

guide temporel intrinsèque (intrinsic tau guide, en anglais) généré par le système nerveux. Au passage, notons que ce guide temporel intrinsèque est pour Warren (Rieser et al., 2005, pp.130-131) une sorte de représentation interne importée par Lee et al. (1999) dans la théorie écologique. Dans la variabilité interindividuelle observée dans l'étude de Craig et al. (2000), le contrôle du geste de frappe par régulation de l'amplitude est majoritaire, comme nous l'avons également observé dans les Clusters 2 et 3. Le Cluster 2 garde relativement invariant le temps de mouvement et régule surtout l'amplitude du geste, tandis que le Cluster 3 fait varier à la fois l'amplitude et la durée de mouvement en se focalisant majoritairement sur l'accélération avant l'impact. Par ailleurs, le choix d'une stratégie spatio-temporelle particulière ne semble pas être spécifique d'une stratégie de coordination motrice, ce qui va dans le sens d'une indépendance entre ces deux sources de variabilité pour le contrôle du mouvement.

## 5.3 Perspectives

Pour résumer, notre cerveau est capable de calibrer un modèle interne de la friction qui est le fruit de nos expériences passées d'interaction avec des surfaces dans différents contextes et de la manipulation de ces surfaces en contact afin d'estimer la valeur du  $\mu$  *subjectif* pour répondre à une tâche.

Il serait intéressant de pouvoir tester si le  $\mu$  *subjectif* calibré pour une tâche de soulever d'objet se généralise à notre tâche de lancer d'objet, ou bien inversement. Lors de la tâche de soulever d'objet, les participants auraient pour consigne de soulever un cube en PLA avec des surfaces planes (aluminium ou balsa) solidaires des doigts (pouce et index), ensuite les participants effectueraient notre tâche expérimentale (ou dans l'ordre inverse). Nous pourrions alors comparer la gestion de la grip force et de l'erreur spatiale en fonction des blocs expérimentaux.

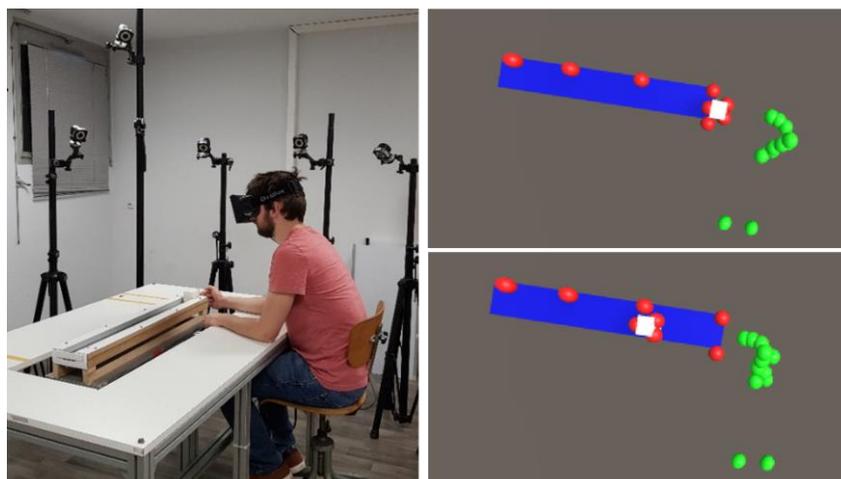
De même dans notre tâche, une étude plus approfondie du rôle de la perception visuelle de la vitesse initiale du cube pour le contrôle du mouvement nécessiterait de manipuler expérimentalement les entrées visuelles et la masse d'un l'objet qui se déplace uniquement sur le plan horizontal. Comme l'illustre l'Équation 3.1, la masse de l'objet n'a aucun impact sur la vitesse optimale de l'objet pour atteindre une distance cible donnée (voir la partie gauche de l'équation). Ce qui est important, c'est la vitesse initiale du cube, indépendamment de sa masse. Prenons l'exemple d'un cube glissant sur une surface horizontale où le participant effectue un bloc d'essais sur une surface en aluminium, puis un autre bloc sur une surface en balsa. Si la valeur du  $\mu$  *subjectif* de chaque surface a été correctement calibrée à la fin de chaque bloc,

alors, si le participant utilise un cube de masse différente (une expérience psychophysique préliminaire peut être nécessaire pour estimer le seuil différentiel de la perception de la masse de l'objet du participant), nous nous attendons à ce qu'il envoie le cube ayant une nouvelle masse à la distance cible avec précision, en transmettant au cube la valeur de l'EC appropriée pour atteindre la même vitesse initiale du cube que précédemment pour chaque matériau de surface. En revanche, si la première moitié de la distance cible était occultée dans les deux premiers blocs, de sorte que la vitesse initiale du cube n'était jamais disponible visuellement, nous nous attendions à une erreur spatiale substantielle après le changement de masse du cube.

$$d = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2}{g[\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)]} = \frac{1}{2} * \frac{v_0^2 * mass}{(g [\sin(\alpha) + \mu \cos(\alpha)] * mass)} = \frac{KE}{(resistive\ force)}$$

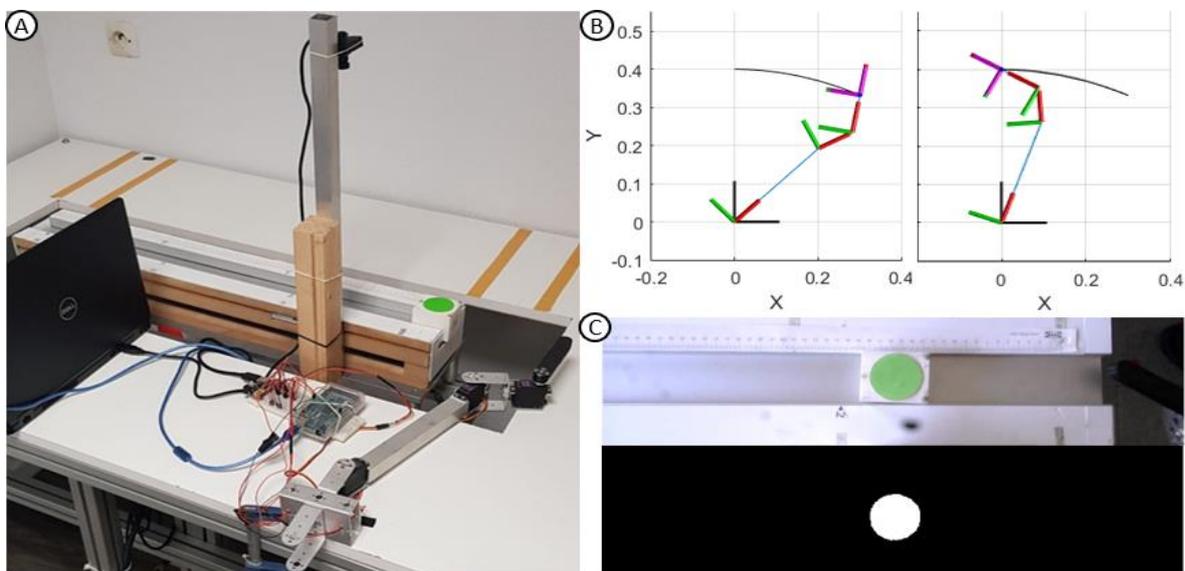
Équation 3.1

Pour aller plus loin, dans le rôle des entrées multisensorielles pour la calibration d'un  $\mu$  *subjectif*, nous pourrions utiliser la réalité virtuelle où le participant voit le cube se déplacer suite à son geste, avec ou sans retour haptique. Dans la condition *avec retour haptique*, il suffit de capturer en temps réel le mouvement de la main et celui du cube afin de les représenter visuellement en réalité virtuelle. A contrario, dans la condition *sans retour haptique*, le geste est capturé et va déplacer un cube virtuel qui suivra les lois de la physique. Nous faisons l'hypothèse que les performances seront similaires, du fait du contrôle du geste basé sur l'erreur spatiale, information présente dans les deux conditions. Cette expérience servira d'étape de validation, comme dans l'expérience de Baurès et al. (2009) qui ont montré que l'utilisation de la réalité virtuelle est appropriée pour étudier les actions d'interception d'objet en chute libre. Une version prototype est en cours de développement où nous sommes actuellement capable de streamer en temps réel les données issues d'un système de capture de mouvement et de les afficher sur un écran ou un casque (cf. Figure 5.3.1.).



*Figure 5.3.1. Illustration de la tâche expérimentale en réalité virtuelle en cours de développement, avec les données streamées en temps réel, les points symbolisant les marqueurs sur le participant.*

Dans un autre protocole de réalité virtuelle nous pourrions étudier la cohérence du  $\mu$  *subjectif* quand les participants doivent détecter une altération de  $\mu$  lorsque l'objet glisse dans une condition donnée. En effet, en réalité virtuelle, il est possible de modifier  $\mu$ , en l'augmentant ou en le diminuant, ce qui aura pour conséquence de modifier la cinématique de l'objet. Ainsi, les participants calibreraient leur  $\mu$  *subjectif* pour 25 cm aluminium. Après chaque lancer, les participants indiqueraient avec un curseur numérique la position où ils pensent que le cube s'est arrêté après leur frappe. Lors d'un changement de condition, par exemple pour 50 cm aluminium,  $\mu$  serait modifié pour certains essais et l'objet virtuel arriverait plus ou moins loin qu'attendu. Si le  $\mu$  *subjectif* a été initialement bien calibré pour l'aluminium, les participants devraient être en mesure de détecter cette modification dans les conséquences visuelles de la frappe et d'indiquer la position finale attendue de l'objet.



*Figure 5.3.2. (A) Bras robotisé commandé par un PC via une carte arduino. Au sommet d'une potence, une caméra haute fréquence (120Hz) filme le déplacement du cube. (B) Simulation du mouvement de la stratégie avant-bras via la cinématique inverse à partir de la trajectoire. (C) A partir de la vidéo du déplacement du cube, la pastille verte est traquée pour obtenir la position et la vitesse du cube au cours du temps (Annexe 7.8.).*

La robotique peut également être utilisée afin de valider nos hypothèses concernant le  $\mu$  *subjectif* dans la paramétrisation du geste pour qu'un objet glisse jusqu'à une cible. En effet, un robot reproduisant les dimensions anatomiques humaines (de Leva, 1996) de l'avant-bras, de la main et de l'index est en cours de développement. Un programme Matlab (combinant script et blocs simulink, voir Annexe 7.8.) permet d'envoyer au servomoteur (via une carte Arduino)

la position angulaire de chaque articulation à chaque pas de temps afin de reproduire le mouvement de frappe. Actuellement, pour contrôler la frappe, le robot utilise la stratégie motrice *avant-bras* avec la stratégie spatio-temporelle du Cluster 1 (amplitude constante mais variation de la durée de mouvement), ce qui suppose de contrôler l'accélération du bout du doigt du robot afin de faire varier la vitesse à l'impact. Comme illustré dans la Figure 5.3.2.B, la trajectoire du bout du doigt du robot est perpendiculaire à la face arrière du cube lors du contact. Le système robotisé apprend à reparamétrer son mouvement d'un essai à l'autre sur la base de la vitesse initiale de l'objet et de l'erreur spatiale. De façon intéressante, Won et collaborateurs (2020) ont développé des robots capables de jouer au curling et d'obtenir des performances similaires à celles des humains dans des conditions réelles. Dans notre cas, la modélisation robotique peut nous permettre de comprendre comment l'être humain calibre son  $\mu$  *subjectif*, en reproduisant chez le robot le même comportement observé dans notre étude dans les transitions entre blocs d'essais. Par la suite, cela peut être appliqué à des robots collaboratifs pour comprendre comment l'être humain prend en compte la friction afin de pouvoir interagir dans des tâches où l'on fait glisser un objet jusqu'à une distance cible.

## 6. Références bibliographiques

- Adams, J. A. (1987). Historical Review and Appraisal of Research on the Learning, Retention, and Transfer of Human Motor Skills. *MOTOR SKILLS*, 34.
- Albert, S. T., Hadjiosif, A. M., Jang, J., Zimnik, A. J., Soteropoulos, D. S., Baker, S. N., Churchland, M. M., Krakauer, J. W., & Shadmehr, R. (2020). Postural control of arm and fingers through integration of movement commands. *eLife*, 9, e52507. <https://doi.org/10.7554/eLife.52507>
- Amorim, M.-A., Siegler, I. A., Baurès, R., & Oliveira, A. M. (2015). The embodied dynamics of perceptual causality: A slippery slope? *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00483>
- Babin-Ratté, S., Sirigu, A., Gilles, M., & Wing, A. (1999). Impaired anticipatory finger grip-force adjustments in a case of cerebellar degeneration. *Experimental Brain Research*, 128(1-2), 81-85. <https://doi.org/10.1007/s002210050821>
- Bartlett, R. (2007). *Introduction to sports biomechanics : Analysing human movement patterns* (2. ed). Routledge.
- Bastian, A. J. (2008). Understanding sensorimotor adaptation and learning for rehabilitation. *Current opinion in neurology*, 21(6), 628-633. <https://doi.org/10.1097/WCO.0b013e328315a293>
- Baurès, R. (2008). Influence de la gravité sur la perception et l'interception d'objets en mouvement [Phdthesis, Université Paris Sud - Paris XI]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00265175>
- Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A., & Hecht, H. (2009). Intercepting real and simulated falling objects: What is the difference? *Journal of Neuroscience Methods*, 184(1), 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2009.07.022>
- Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A., & Siegler, I. A. (2007). Intercepting free falling objects: Better use Occam's razor than internalize Newton's law. *Vision Research*, 47(23), 2982-2991. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.07.024>
- Berardelli, A., Hallett, M., Rothwell, J. C., Agostino, R., Manfredi, M., Thompson, P. D., & Marsden, C. D. (1996). Single-joint rapid arm movements in normal subjects and in patients with motor disorders. *Brain*, 119(2), 661-674. <https://doi.org/10.1093/brain/119.2.661>
- Bernshteïn, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press. <http://books.google.com/books?id=F9dqAAAAMAAJ>
- Biryukova, E. V., & Bril, B. (2008). Organization of Goal-Directed Action at a High Level of Motor Skill: The Case of Stone Knapping in India. *Motor Control*, 12(3), 181-209. <https://doi.org/10.1123/mcj.12.3.181>
- Biryukova, E. V., Bril, B., Frolov, A. A., & Koulikov, M. A. (2015). Movement Kinematics as an Index of the Level of Motor Skill: The Case of Indian Craftsmen Stone Knapping. *Motor Control*, 19(1), 34-59. <https://doi.org/10.1123/mc.2013-0042>

- Blakemore, S.-J., & Sirigu, A. (2003). Action prediction in the cerebellum and in the parietal lobe. *Experimental Brain Research*, *153*(2), 239-245. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1597-z>
- Bootsma, R. J., & van Wieringen, P. C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *16*(1), 21-29. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.21>
- Bril, B., Rein, R., Nonaka, T., Wenban-Smith, F., & Dietrich, G. (2010). The role of expertise in tool use: Skill differences in functional action adaptations to task constraints. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(4), 825-839. <https://doi.org/10.1037/a0018171>
- Bril, B., Smaers, J., Steele, J., Rein, R., Nonaka, T., Dietrich, G., Biryukova, E., Hirata, S., & Roux, V. (2012). Functional mastery of percussive technology in nut-cracking and stone-flaking actions: Experimental comparison and implications for the evolution of the human brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *367*(1585), 59-74. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0147>
- Canlas, I. P. (2019). Using visual representations in identifying students' preconceptions in friction. *Research in Science & Technological Education*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02635143.2019.1660630>
- Cappellini, G., Ivanenko, Y. P., Dominici, N., Poppele, R. E., & Lacquaniti, F. (2010). Motor Patterns During Walking on a Slippery Walkway. *Journal of Neurophysiology*, *103*(2), 746-760. <https://doi.org/10.1152/jn.00499.2009>
- Chauvel, G., Maquestiaux, F., Hartley, A. A., Joubert, S., Didierjean, A., & Masters, R. S. W. (2012). Age Effects Shrink when Motor Learning is Predominantly Supported by Nondeclarative, Automatic Memory Processes: Evidence from Golf Putting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(1), 25-38. <https://doi.org/10.1080/17470218.2011.588714>
- Chiovetto, E., Berret, B., & Pozzo, T. (2010). Tri-dimensional and triphasic muscle organization of whole-body pointing movements. *Neuroscience*, *170*(4), 1223-1238. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.07.006>
- Craig, C. M., Delay, D., Greal, M. A., & Lee, D. N. (2000). Guiding the swing in golf putting. *Nature*, *405*(6784), 295-296. <https://doi.org/10.1038/35012690>
- Craik, K. J. W. (1947). Theory of the human operator in control systems: i. the operator as an engineering system. *British Journal of Psychology. General Section*, *38*(2), 56-61. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1947.tb01141.x>
- Danion, F., & Sarlegna, F. R. (2007). Can the Human Brain Predict the Consequences of Arm Movement Corrections When Transporting an Object? Hints from Grip Force Adjustments. *Journal of Neuroscience*, *27*(47), 12839-12843. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3110-07.2007>
- de Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, *29*(9), 1223-1230.

- Della-Maggiore, V., Landi, S. M., & Villalta, J. I. (2015). Sensorimotor Adaptation : Multiple Forms of Plasticity in Motor Circuits. *The Neuroscientist*, 21(2), 109-125. <https://doi.org/10.1177/1073858414545228>
- Dépeault, A., Meftah, E.-M., & Chapman, C. E. (2008). Tactile Speed Scaling : Contributions of Time and Space. *Journal of Neurophysiology*, 99(3), 1422-1434. <https://doi.org/10.1152/jn.01209.2007>
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 9.
- Dijkstra, T. M. H., Katsumata, H., de Rugy, A., & Sternad, D. (2004). *The dialogue between data and model : Passive stability and relaxation behavior in a ball bouncing task*. 26.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*. <https://doi.org/10.1037/H0055392>
- Flanagan, J. R., & Wing, A. M. (1997). The Role of Internal Models in Motion Planning and Control : Evidence from Grip Force Adjustments during Movements of Hand-Held Loads. *The Journal of Neuroscience*, 17(4), 1519-1528. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.17-04-01519.1997>
- Flanagan, J. R., & Wing, Alan M. (1993). Modulation of grip force with load force during point-to-point arm movements. *Experimental Brain Research*, 95(1). <https://doi.org/10.1007/BF00229662>
- Flash, T., & Hochner, B. (2005). Motor primitives in vertebrates and invertebrates. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(6), 660-666. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.10.011>
- Ford, J. M., & Mathalon, D. H. (2019). Efference Copy, Corollary Discharge, Predictive Coding, and Psychosis. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 4(9), 764-767. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2019.07.005>
- Forsberg, H., Eliasson, A. C., Kinoshita, H., Johansson, R. S., & Westling, G. (1991). Development of human precision grip I: Basic coordination of force. *Experimental Brain Research*, 85(2). <https://doi.org/10.1007/BF00229422>
- Gan, K.-C., & Hoffmann, E. R. (1988). Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements. *Ergonomics*, 31(5), 829-839. <https://doi.org/10.1080/00140138808966724>
- Gaveau, J., Berret, B., Angelaki, D. E., & Papaxanthis, C. (2016). Direction-dependent arm kinematics reveal optimal integration of gravity cues. *eLife*, 5, e16394. <https://doi.org/10.7554/eLife.16394>
- Giszter, S. F. (2015). Motor primitives—New data and future questions. *Current Opinion in Neurobiology*, 33, 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2015.04.004>
- Hadjiosif, A. M., Krakauer, J. W., & Haith, A. M. (2021). Did We Get Sensorimotor Adaptation Wrong? Implicit Adaptation as Direct Policy Updating Rather than Forward-Model-Based Learning. *Journal of Neuroscience*, 41(12), 2747-2761. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2125-20.2021>
- Harris, C. M., & Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*,

394(6695), 780-784. <https://doi.org/10.1038/29528>

- Hecht, H. (2014). Beyond Illusions : On the Limitations of Perceiving Relational Properties. In T. Metzinger & J. M. Windt (Éds.), *Open MIND*. Open MIND. Frankfurt am Main: MIND Group. <https://doi.org/10.15502/9783958570290>
- Hubbard, T. L. (1995a). Cognitive representation of motion : Evidence for friction and gravity analogues. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(1), 241-254. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.21.1.241>
- Hubbard, T. L. (1995b). Environmental invariants in the representation of motion : Implied dynamics and representational momentum, gravity, friction, and centripetal force. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2(3), 322-338. <https://doi.org/10.3758/BF03210971>
- Hubbard, T. L. (1998). Some effects of representational friction, target size, and memory averaging on memory for vertically moving targets. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 52(1), 44-49. <https://doi.org/10.1037/h0087278>
- Hubbard, T. L. (2005). Representational momentum and related displacements in spatial memory : A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(5), 822-851. <https://doi.org/10.3758/BF03196775>
- Hubbard, T. L. (2020). Representational gravity : Empirical findings and theoretical implications. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(1), 36-55. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01660-3>
- Indovina, I., Maffei, V., Bosco, G., Zago, M., Macaluso, E., & Lacquaniti, F. (2005). Representation of Visual Gravitational Motion in the Human Vestibular Cortex. *Science*, 308(5720), 416-419. <https://doi.org/10.1126/science.1107961>
- Joh, A. S., Adolph, K. E., Campbell, M. R., & Eppler, M. A. (2006). Why walkers slip : Shine is not a reliable cue for slippery ground. *Perception & Psychophysics*, 68(3), 339-352. <https://doi.org/10.3758/BF03193681>
- Joh, A. S., Adolph, K. E., Narayanan, P. J., & Dietz, V. A. (2007). Gauging possibilities for action based on friction underfoot. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1145-1157. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.5.1145>
- Johansson, R. S. (1996). Sensory Control of Dexterous Manipulation in Humans. In *Hand and Brain* (p. 381-414). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012759440-8/50025-6>
- Johansson, R. S., & Flanagan, J. R. (2009). Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(5), 345-359. <https://doi.org/10.1038/nrn2621>
- Johansson, R. S., & Westling, G. (1984). Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Experimental Brain Research*, 56(3), 550-564. <https://doi.org/10.1007/BF00237997>
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (Éds.). (1988). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice-Hall, Inc.

- Jörges, B., & López-Moliner, J. (2017). Gravity as a Strong Prior : Implications for Perception and Action. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00203>
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, *9*(6), 718-727. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(99)00028-8)
- Kawato, M. (2009). Cerebellum : Models. In L. R. Squire (Éd.), *Encyclopedia of Neuroscience* (p. 757-767). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045046-9.01307-3>
- Klatzky, R. L., Pawluk, D., & Peer, A. (2013). Haptic Perception of Material Properties and Implications for Applications. *Proceedings of the IEEE*, *101*(9), 2081-2092. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2248691>
- Klein, L. K., Maiello, G., Fleming, R. W., & Voudouris, D. (2021). Friction is preferred over grasp configuration in precision grip grasping. *BioRxiv*, 2021.01.13.426550. <https://doi.org/10.1101/2021.01.13.426550>
- Kroetz, T., Livorati, A. L. P., Leonel, E. D., & Caldas, I. L. (2015). Global ballistic acceleration in a bouncing-ball model. *Physical Review E*, *92*(1), 012905. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.012905>
- Lacquaniti, F., Bosco, G., Gravano, S., Indovina, I., La Scaleia, B., Maffei, V., & Zago, M. (2014). Multisensory Integration and Internal Models for Sensing Gravity Effects in Primates. *BioMed Research International*, *2014*, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/615854>
- Lacquaniti, F., Bosco, G., Gravano, S., Indovina, I., La Scaleia, B., Maffei, V., & Zago, M. (2015). Gravity in the Brain as a Reference for Space and Time Perception. *Multisensory Research*, *28*(5-6), 397-426. <https://doi.org/10.1163/22134808-00002471>
- Land, M. F. (2014). Do we have an internal model of the outside world? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*(1636), 20130045. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0045>
- Larsson, J. (2013). Children's Encounters With Friction as Understood as a Phenomenon of Emerging Science and as "Opportunities for Learning". *Journal of Research in Childhood Education*, *27*(3), 377-392. <https://doi.org/10.1080/02568543.2013.796335>
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception : A tutorial. *Attention, Perception & Psychophysics*, *71*(7), 1439-1459. <https://doi.org/10.3758/APP.71.7.1439>
- Lee, D. N., Craig, C. M., & Grealy, M. A. (1999). Sensory and intrinsic coordination of movement. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *266*(1432), 2029-2035.
- Lin, J.-F., & Drury, C. G. (2011). Verification of Two Models of Ballistic Movements. In J. A. Jacko (Éd.), *Human-Computer Interaction. Interaction Techniques and Environments* (p. 275-284). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-21605-3\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-642-21605-3_31)
- Lin, R. F., & Drury, C. G. (2013). Verification of models for ballistic movement time and endpoint variability. *Ergonomics*, *56*(4), 623-636. <https://doi.org/10.1080/00140139.2013.765603>

- Loomis, J. M., & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. *Handbook of perception and human performances*, 2(2), 2.
- MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' Law as a Research and Design Tool in Human-Computer Interaction. *Human-Computer Interaction*, 7(1), 91-139. [https://doi.org/10.1207/s15327051hci0701\\_3](https://doi.org/10.1207/s15327051hci0701_3)
- Mackrous, I., Carriot, J., Jamali, M., & Cullen, K. E. (2019). Cerebellar Prediction of the Dynamic Sensory Consequences of Gravity. *Current Biology*, 29(16), 2698-2710.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.006>
- Marin, L., & Danion, F. (2005). *Neurosciences : Contrôle et apprentissage moteur*. Ellipses.
- Marteniuk, R. G., Mackenzie, C. L., Jeannerod, M., Athenes, S., & Dugas, C. (1987). Constraints on human arm movement trajectories. *Canadian Journal of Psychology/Revue Canadienne de Psychologie*, 41(3), 365-378. <https://doi.org/10.1037/h0084157>
- Martin, T. A., Greger, B. E., Norris, S. A., & Thach, W. T. (2001). Throwing Accuracy in the Vertical Direction During Prism Adaptation: Not Simply Timing of Ball Release. *Journal of Neurophysiology*, 85(5), 2298-2302. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.85.5.2298>
- Maselli, A., Dhawan, A., Russo, M., Cesqui, B., Lacquaniti, F., & d'Avella, A. (2019). A whole body characterization of individual strategies, gender differences, and common styles in overarm throwing. *Journal of Neurophysiology*, 122(6), 2486-2503. <https://doi.org/10.1152/jn.00011.2019>
- McIntyre, J., Senot, P., Prevost, P., Zago, M., Lacquaniti, F., & Berthoz, A. (2003). The use of on-line perceptual invariants versus cognitive internal models for the predictive control of movement and action. *First International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, 2003. Conference Proceedings.*, 438-441. <https://doi.org/10.1109/CNE.2003.1196855>
- McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (2001). Does the brain model Newton's laws? *Nature Neuroscience*, 4(7), 693-694. <https://doi.org/10.1038/89477>
- McNamee, D., & Wolpert, D. M. (2019). Internal Models in Biological Control. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2(1), 339-364. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105206>
- Michotte, A. (2017). *The Perception of Causality*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315519050>
- Müller, H., & Sternad, D. (2009). Motor Learning: Changes in the Structure of Variability in a Redundant Task. In D. Sternad (Éd.), *Progress in Motor Control* (Vol. 629, p. 439-456). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2_23)
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Opsomer, L., Théate, V., Lefèvre, P., & Thonnard, J.-L. (2018). Dexterous Manipulation During Rhythmic Arm Movements in Mars, Moon, and Micro-Gravity. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2018.00938>

- O'Shea, H., & Redmond, S. J. (2021). A review of the neurobiomechanical processes underlying secure gripping in object manipulation. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *123*, 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.01.007>
- Palmer, E., Cafarelli, E., & Ashby, P. (1994). The processing of human ballistic movements explored by stimulation over the cortex. *The Journal of Physiology*, *481*(Pt 2), 509-520.
- Petrič, T., Simpson, C. S., Ude, A., & Ijspeert, A. J. (2017). Hammering Does Not Fit Fitts' Law. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00045>
- Prasad, V. S. N., Kellokumpu, V., & Davis, L. S. (2006). Ballistic Hand Movements. In F. J. Perales & R. B. Fisher (Éds.), *Articulated Motion and Deformable Objects* (p. 153-164). Springer. [https://doi.org/10.1007/11789239\\_16](https://doi.org/10.1007/11789239_16)
- Rieser, J. J., Lockman, J. J., & Nelson, C. A. (2005). *Action As An Organizer of Learning and Development: Volume 33 in the Minnesota Symposium on Child Psychology Series*. Psychology Press.
- Saels, P., Thonnard, J. L., Detrembleur, C., & Smith, A. M. (1999). Impact of the surface slipperiness of grasped objects on their subsequent acceleration. *Neuropsychologia*, *37*(6), 751-756. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(98\)00113-4](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(98)00113-4)
- Sarlegna, F. R., Baud-Bovy, G., & Danion, F. (2010). Delayed Visual Feedback Affects Both Manual Tracking and Grip Force Control When Transporting a Handheld Object. *Journal of Neurophysiology*, *104*(2), 641-653. <https://doi.org/10.1152/jn.00174.2010>
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/h0076770>
- Schmidt, R. A. (1976). The Schema as a Solution to Some Persistent Problems in Motor Learning Theory. In *Motor Control* (p. 41-65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-665950-4.50007-9>
- Schmidt, R. A. (2003). Motor Schema Theory after 27 Years : Reflections and Implications for a New Theory. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *74*(4), 366-375. <https://doi.org/10.1080/02701367.2003.10609106>
- Schmidt, R. A., & Debû, B. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Vigot.
- Schot, W. D., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2010). Robust movement segmentation by combining multiple sources of information. *Journal of Neuroscience Methods*, *187*(2), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.01.004>
- Scott, S. H., & Kalaska, J. F. (1997). Reaching Movements With Similar Hand Paths But Different Arm Orientations. I. Activity of Individual Cells in Motor Cortex. *Journal of Neurophysiology*, *77*(2), 826-852. <https://doi.org/10.1152/jn.1997.77.2.826>
- Slater-Hammel, A. T. (1960). Reliability, Accuracy, and Refractoriness of a Transit Reaction. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, *31*(2), 217-228. <https://doi.org/10.1080/10671188.1960.10613098>

- Smeets, J. B. J., Martin, J., & Brenner, E. (2010). Similarities between digits' movements in grasping, touching and pushing. *Experimental Brain Research*, 203(2), 339-346. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2236-0>
- Sternad, D. (2018). It's not (only) the mean that matters : Variability, noise and exploration in skill learning. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 20, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.01.004>
- Sternad, D., Duarte, M., Katsumata, H., & Schaal, S. (2000). Dynamics of a bouncing ball in human performance. *Physical Review E*, 63(1), 011902. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.011902>
- Takamuku, S., & Gomi, H. (2019). Better grip force control by attending to the controlled object : Evidence for direct force estimation from visual motion. *Scientific Reports*, 9(1), 13114. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49359-8>
- Temprado, J., Della-Graza, M., Farrell, M., & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volleyball serve. *Human Movement Science*, 16(5), 653-676. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(97\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(97)00014-6)
- Ulloa, A., Bullock, D., & Rhodes, B. J. (2003). Adaptive force generation for precision-grip lifting by a spectral timing model of the cerebellum. *Neural Networks*, 16(5-6), 521-528. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(03\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(03)00094-7)
- White, O., Karniel, A., Papaxanthis, C., Barbiero, M., & Nisky, I. (2018). Switching in Feedforward Control of Grip Force During Tool-Mediated Interaction With Elastic Force Fields. *Frontiers in Neurorobotics*, 12, 31. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00031>
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed). Wiley.
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 739-751. <https://doi.org/10.1038/nrn3112>
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, 11(18), R729-R732. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(01\)00432-8](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(01)00432-8)
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2010). Motor learning. *Current Biology*, 20(11), R467-R472. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.04.035>
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998a). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11(7-8), 1317-1329. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00066-5)
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998b). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11(7-8), 1317-1329. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(98)00066-5)
- Won, D.-O., Müller, K.-R., & Lee, S.-W. (2020). An adaptive deep reinforcement learning framework enables curling robots with human-like performance in real-world conditions. *Science Robotics*, 5(46), eabb9764. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abb9764>
- Wu, G., van der Helm, F. C. T., (DirkJan) Veeger, H. E. J., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A. R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F. W., & Buchholz, B. (2005).

ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: Shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5), 981-992. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042>

Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., Ivanenko, Y. P., & Lacquaniti, F. (2005). Fast Adaptation of the Internal Model of Gravity for Manual Interceptions: Evidence for Event-Dependent Learning. *Journal of Neurophysiology*, 93(2), 1055-1068. <https://doi.org/10.1152/jn.00833.2004>

Zhang, X., Lee, S.-W., & Braido, P. (2003). Determining finger segmental centers of rotation in flexion–extension based on surface marker measurement. *Journal of Biomechanics*, 36(8), 1097-1102. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(03\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(03)00112-X)

# 7. Annexes

## Annexe 7.1.

| Surface                         | Vinyle        | Alu           | Balsa         | Bois<br>recomposé | Téflon        | Film PVC      |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
| Coefficient de frottement moyen | 0,19          | 0,32          | 0,39          | 0,27              | 0,21          | 0,48          |
| Ecart type                      | 0,005         | 0,022         | 0,028         | 0,034             | 0,007         | 0,047         |
| Intervalle de confiance         | [0.18 ; 0.20] | [0,31 ; 0.33] | [0.38 ; 0.41] | [0.26 ; 0.29]     | [0.21 ; 0.22] | [0.46 ; 0.51] |

*Tableau 7.1. Coefficient de frottement cinétique pour toutes les surfaces testées avec le cube, obtenu à partir de 20 lancers.*

## Annexe 7.2.

| Ordre de lancer 20-40-60cm |                   |                   |                   |                   |                   |
|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Vinyle                     |                   | Aluminium         |                   | Balsa             |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| Balsa                      |                   | Aluminium         |                   | Vinyle            |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| Balsa                      |                   | Aluminium         |                   | Vinyle            |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 20 cm 40 cm 60 cm          | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm | 20 cm 40 cm 60 cm |
| Ordre de lancer 60-40-20cm |                   |                   |                   |                   |                   |
| Vinyle                     |                   | Aluminium         |                   | Balsa             |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |
| Balsa                      |                   | Aluminium         |                   | Vinyle            |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |
| Balsa                      |                   | Aluminium         |                   | Vinyle            |                   |
| 0°                         | +10°              | 0°                | -10°              | 0°                | +10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |
| 0°                         | -10°              | 0°                | +10°              | 0°                | -10°              |
| 60 cm 40 cm 20 cm          | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm | 60 cm 40 cm 20 cm |

**Tableau 7.2. Expérience 1 : Description de l'ordre des blocs utilisés dans l'expérience par chacun des 8 groupes.** Il y a le groupe d'ordre de lancer en fonction de distances cibles "20-40-60cm" et celui d'ordre de lancers des blocs "60-40-20cm". Chaque groupe d'ordre de bloc de lancers a été subdivisé en deux sous-groupes pour l'ordre des surfaces : l'un commençant par l'ordre Vinyle-Aluminium-Balsa (en gris plein), et l'autre dans l'ordre inverse (en gris hachuré). Chaque sous-groupe d'ordre de surfaces a été subdivisé en deux sous-groupes pour l'ordre des inclinaisons : "0°, -10°, +10°" et "0°, +10°, -10°".

### Annexe 7.3.

| Effet  | Erreur spatiale (%) |                  |          |          |          | Vitesse initiale du cube (m/s) |                  |          |          |          |
|--|---------------------|------------------|----------|----------|----------|--------------------------------|------------------|----------|----------|----------|
|  | SC                  | Degré de Liberté | MC       | F        | p        | SC                             | Degré de Liberté | MC       | F        | p        |
| <i>Ordonnée à l'origine</i>                            | 132370,3            | 1                | 132370,3 | 27,81600 | 0,000094 | 4546,401                       | 1                | 4546,401 | 3473,266 | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 71381,8             | 15               | 4758,8   |          |          | 19,635                         | 15               | 1,309    |          |          |
| <i>Matériau</i>  | 674359,0            | 2                | 337179,5 | 42,79866 | 0,000000 | 242,746                        | 2                | 121,373  | 48,986   | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 236348,2            | 30               | 7878,3   |          |          | 74,331                         | 30               | 2,478    |          |          |
| <i>Inclinaison</i>                                     | 632244,0            | 2                | 316122,0 | 58,67164 | 0,000000 | 143,173                        | 2                | 71,586   | 35,654   | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 161639,6            | 30               | 5388,0   |          |          | 60,235                         | 30               | 2,008    |          |          |
| <i>Distance cible</i>                                  | 681039,0            | 2                | 340519,5 | 88,03156 | 0,000000 | 160,810                        | 2                | 80,405   | 363,460  | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 116044,6            | 30               | 3868,2   |          |          | 6,637                          | 30               | 0,221    |          |          |
| <i>Essai</i>   | 22050,0             | 4                | 5512,5   | 4,69734  | 0,002301 | 1,672                          | 4                | 0,418    | 5,173    | 0,001199 |
| <i>Erreur</i>  | 70412,4             | 60               | 1173,5   |          |          | 4,849                          | 60               | 0,081    |          |          |
| <i>Matériau x Inclinaison</i>                          | 954365,9            | 4                | 238591,5 | 89,59595 | 0,000000 | 23,832                         | 4                | 5,958    | 33,006   | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 159778,3            | 60               | 2663,0   |          |          | 10,831                         | 60               | 0,181    |          |          |
| <i>Matériau x Distance cible</i>                       | 249479,5            | 4                | 62369,9  | 35,61437 | 0,000000 | 5,503                          | 4                | 1,376    | 6,242    | 0,000287 |
| <i>Erreur</i>  | 105075,3            | 60               | 1751,3   |          |          | 13,224                         | 60               | 0,220    |          |          |
| <i>Inclinaison x Distance cible</i>                    | 257403,1            | 4                | 64350,8  | 36,27304 | 0,000000 | 2,151                          | 4                | 0,538    | 4,744    | 0,002156 |
| <i>Erreur</i>  | 106444,0            | 60               | 1774,1   |          |          | 6,802                          | 60               | 0,113    |          |          |
| <i>Matériau x Essai</i>                                | 8359,8              | 8                | 1045,0   | 0,86534  | 0,547815 | 1,812                          | 8                | 0,227    | 3,216    | 0,002404 |
| <i>Erreur</i>  | 144911,5            | 120              | 1207,6   |          |          | 8,454                          | 120              | 0,070    |          |          |
| <i>Inclinaison x Essai</i>                             | 5004,5              | 8                | 625,6    | 0,57414  | 0,797415 | 1,035                          | 8                | 0,129    | 1,963    | 0,056828 |
| <i>Erreur</i>  | 130747,7            | 120              | 1089,6   |          |          | 7,910                          | 120              | 0,066    |          |          |
| <i>Essai x Distance cible</i>                          | 12772,1             | 8                | 1596,5   | 1,50873  | 0,161106 | 0,465                          | 8                | 0,058    | 1,051    | 0,402096 |
| <i>Erreur</i>  | 126981,6            | 120              | 1058,2   |          |          | 6,635                          | 120              | 0,055    |          |          |
| <i>Matériau x Inclinaison x Distance cible</i>         | 692173,9            | 8                | 86521,7  | 67,25313 | 0,000000 | 2,096                          | 8                | 0,262    | 3,273    | 0,002072 |
| <i>Erreur</i>  | 154381,0            | 120              | 1286,5   |          |          | 9,609                          | 120              | 0,080    |          |          |
| <i>Matériau x Inclinaison x Essai</i>                  | 17456,2             | 16               | 1091,0   | 1,10253  | 0,353189 | 1,637                          | 16               | 0,102    | 1,732    | 0,041700 |
| <i>Erreur</i>  | 237493,4            | 240              | 989,6    |          |          | 14,179                         | 240              | 0,059    |          |          |
| <i>Matériau x Distance cible x Essai</i>               | 14404,4             | 16               | 900,3    | 0,93163  | 0,533546 | 1,793                          | 16               | 0,112    | 1,818    | 0,029603 |
| <i>Erreur</i>  | 231922,8            | 240              | 966,3    |          |          | 14,796                         | 240              | 0,062    |          |          |
| <i>Inclinaison x Distance cible x Essai</i>            | 6611,0              | 16               | 413,2    | 0,42374  | 0,975519 | 0,533                          | 16               | 0,033    | 0,545    | 0,920967 |
| <i>Erreur</i>  | 234021,8            | 240              | 975,1    |          |          | 14,661                         | 240              | 0,061    |          |          |
| <i>Matériau x Inclinaison x Distance cible x Essai</i> | 26309,8             | 32               | 822,2    | 0,90700  | 0,616546 | 2,258                          | 32               | 0,071    | 1,188    | 0,223921 |
| <i>Erreur</i>  | 435114,4            | 480              | 906,5    |          |          | 28,507                         | 480              | 0,059    |          |          |

Tableau 7.3. Expérience 1 : Tableau récapitulatif d'ANOVA à mesures répétées pour l'erreur spatiale et la vitesse initiale du cube.

## Annexe 7.4.

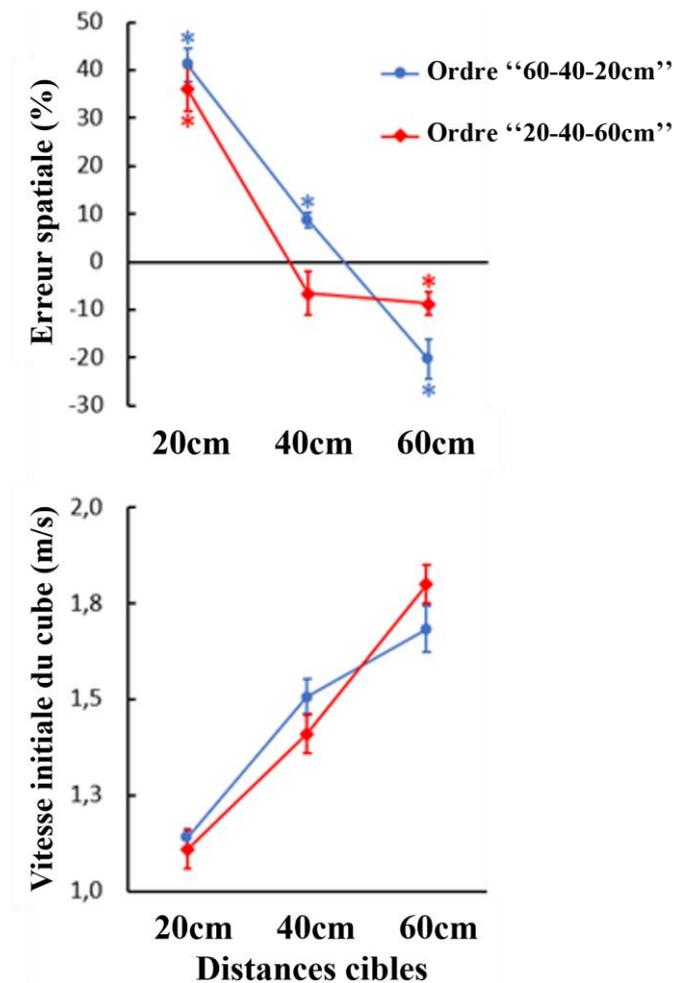


Figure 7.1 Expérience 1 : Interaction entre les distances cibles (effet intra) pour les ordres de lancers (effet inter) au premier essai de chaque condition (moyenne  $\pm$  erreur-type).

Dans notre première expérience, quand les participants découvrent les conditions au premier essai, nous avons cherché à comprendre si l'ordre de lancer du plus proche au plus éloigné (en rouge) conduit à de meilleures performances que dans l'ordre inverse (en bleu), à l'instar de Chauvel et al. (2012), dans leur étude du putting au golf. Des ANOVA à mesures répétées ont mis en évidence une interaction significative entre *distance cible* et *ordre de lancer*, pour l'erreur spatiale ( $F(2, 28) = 7.28, p = 0.003$ ) et pour la vitesse initiale de cube ( $F(2, 28) = 3.72, p = 0.037$ ). Des tests *t* de Student corrigés (correction de Bonferroni) ont permis de comparer l'erreur spatiale moyenne par rapport à 0% pour un ordre de lancer donné avec le critère  $p < 0.05/3 = 0.017$  ; les comparaisons significatives sont indiquées par une étoile dans la Figure 7.1. Les comparaisons post hoc de Bonferroni ont été réalisées sur l'effet *distance cible* pour un ordre de lancer donné.

Pour l'ordre de lancer « 20-40-60 cm », les comparaisons à zéro montrent une absence d'erreur spatiale significative uniquement pour la distance cible de 40 cm. Même si l'erreur spatiale par rapport à zéro est significative à 60 cm, la performance ne diffère pas significativement entre 40 cm et 60 cm ( $p = 1$ ). Ce paradoxe est dû au fait que les participants sont moins variables à 60 cm ; ce qui génère une différence significative par rapport à 0%. Pour la vitesse initiale du cube, les comparaisons post-hocs montrent que les trois distances cibles diffèrent significativement les unes des autres ( $ps < 0.001$ ).

Pour l'ordre de lancer « 60-40-20 cm », l'erreur spatiale de chacune des trois distances cibles est significativement différente de 0%. Les comparaisons post hoc de Bonferroni montrent par ailleurs que l'erreur spatiale des trois distances cibles diffère significativement les unes des autres ( $ps < 0.001$ ). Pour la vitesse initiale, les comparaisons post hoc de Bonferroni pour la *distance cible* montrent des différences significatives entre conditions de distance cible sauf entre 40 cm et 60 cm ( $p = 0.069$ ).

Pour l'ordre de lancer « 20-40-60 cm », lorsque les participants réalisent leur premier essai à 20 cm ils surestiment la friction mais, à 40 cm, ils arrivent à une performance optimale. Finalement, pour 60 cm, même s'ils ont légèrement sous-estimé la friction, ils ont significativement augmenté la vitesse à l'impact. Contrairement à l'ordre « 60-40-20 cm », où les participants commencent à 60 cm et sous-estiment la friction au premier essai. Lors du passage à 40 cm, ils ne changent pas suffisamment la vitesse initiale du cube par rapport à la distance précédente ce qui conduit à une surestimation de la friction. A 20 cm, même s'ils ont diminué la vitesse, ils ne l'ont pas suffisamment réduite. Pour conclure, à l'instar de Chauvel et al. (2012), l'ordre de lancer « 20-40-60cm » semble donc plus propice à une minimisation de l'erreur spatiale lors de la découverte des conditions de *distance cible* que l'ordre inverse « 60-40-20 cm ».

## Annexe 7.5.

| Effet  | Erreur spatiale (%) |                  |          |          |          | Vitesse initiale du cube (m/s) |                  |          |          |          |
|--|---------------------|------------------|----------|----------|----------|--------------------------------|------------------|----------|----------|----------|
|  | SC                  | Degré de Liberté | MC       | F        | p        | SC                             | Degré de Liberté | MC       | F        | p        |
| <b>Ordonnée à l'origine</b>                            | 132294,5            | 1                | 132294,5 | 24,72297 | 0,000022 | 11012,64                       | 1                | 11012,64 | 9887,292 | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 171234,4            | 32               | 5351,1   |          |          | 35,64                          | 32               | 1,11     |          |          |
| <b>Distance cible</b>                                  | 22347,0             | 1                | 22347,0  | 21,16482 | 0,000063 | 305,18                         | 1                | 305,18   | 1938,908 | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 33787,5             | 32               | 1055,9   |          |          | 5,04                           | 32               | 0,16     |          |          |
| <b>Matériau</b>  | 17947,5             | 1                | 17947,5  | 17,31060 | 0,000223 | 19,66                          | 1                | 19,66    | 127,775  | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 33177,3             | 32               | 1036,8   |          |          | 4,92                           | 32               | 0,15     |          |          |
| <b>Distance cible</b>                                  | 30520,4             | 2                | 15260,2  | 17,24917 | 0,000001 | 106,49                         | 2                | 53,24    | 241,032  | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 56620,3             | 64               | 884,7    |          |          | 14,14                          | 64               | 0,22     |          |          |
| <b>Essai</b>   | 47133,8             | 9                | 5237,1   | 8,79812  | 0,000000 | 9,42                           | 9                | 1,05     | 17,679   | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 171432,5            | 288              | 595,3    |          |          | 17,06                          | 288              | 0,06     |          |          |
| <b>Distance cible x Matériau</b>                       | 183,4               | 1                | 183,4    | 0,32302  | 0,573766 | 0,69                           | 1                | 0,69     | 10,779   | 0,002488 |
| <i>Erreur</i>  | 18172,5             | 32               | 567,9    |          |          | 2,05                           | 32               | 0,06     |          |          |
| <b>Distance cible x Inclinaison</b>                    | 11059,3             | 2                | 5529,7   | 12,30262 | 0,000030 | 2,34                           | 2                | 1,17     | 20,063   | 0,000000 |
| <i>Erreur</i>  | 28766,1             | 64               | 449,5    |          |          | 3,73                           | 64               | 0,06     |          |          |
| <b>Matériaux x Inclinaison</b>                         | 3485,9              | 2                | 1742,9   | 3,85610  | 0,026229 | 1,52                           | 2                | 0,76     | 14,823   | 0,000005 |
| <i>Erreur</i>  | 28927,6             | 64               | 452,0    |          |          | 3,27                           | 64               | 0,05     |          |          |
| <b>Distance cible x Essai</b>                          | 5296,8              | 9                | 588,5    | 1,19558  | 0,297435 | 0,35                           | 9                | 0,04     | 0,922    | 0,506378 |
| <i>Erreur</i>  | 141769,1            | 288              | 492,3    |          |          | 12,21                          | 288              | 0,04     |          |          |
| <b>Matériaux x Essai</b>                               | 12325,0             | 9                | 1369,4   | 3,03349  | 0,001758 | 0,79                           | 9                | 0,09     | 2,146    | 0,025901 |
| <i>Erreur</i>  | 130015,2            | 288              | 451,4    |          |          | 11,71                          | 288              | 0,04     |          |          |
| <b>Inclinaison x Essai</b>                             | 26354,4             | 18               | 1464,1   | 2,98993  | 0,000035 | 2,49                           | 18               | 0,14     | 3,320    | 0,000005 |
| <i>Erreur</i>  | 282060,6            | 576              | 489,7    |          |          | 24,04                          | 576              | 0,04     |          |          |
| <b>Distance cible x Matériau x Inclinaison</b>         | 78,7                | 2                | 39,4     | 0,09964  | 0,905303 | 0,09                           | 2                | 0,04     | 0,814    | 0,447534 |
| <i>Erreur</i>  | 25282,3             | 64               | 395,0    |          |          | 3,46                           | 64               | 0,05     |          |          |
| <b>Distance cible x Matériau x Essai</b>               | 8090,5              | 9                | 898,9    | 1,93007  | 0,047627 | 0,62                           | 9                | 0,07     | 1,772    | 0,073126 |
| <i>Erreur</i>  | 134138,0            | 288              | 465,8    |          |          | 11,12                          | 288              | 0,04     |          |          |
| <b>Distance cible x Inclinaison x Essai</b>            | 9302,9              | 18               | 516,8    | 1,22550  | 0,234396 | 0,99                           | 18               | 0,05     | 1,560    | 0,065198 |
| <i>Erreur</i>  | 242917,3            | 576              | 421,7    |          |          | 20,29                          | 576              | 0,04     |          |          |
| <b>Matériau x Inclinaison x Essai</b>                  | 20027,2             | 18               | 1112,6   | 2,36124  | 0,001269 | 1,64                           | 18               | 0,09     | 2,187    | 0,003215 |
| <i>Erreur</i>  | 271412,3            | 576              | 471,2    |          |          | 23,97                          | 576              | 0,04     |          |          |
| <b>Distance cible x Matériau x Inclinaison x Essai</b> | 3590,1              | 18               | 199,4    | 0,44146  | 0,978620 | 0,33                           | 18               | 0,02     | 0,477    | 0,967512 |
| <i>Erreur</i>  | 260233,8            | 576              | 451,8    |          |          | 21,95                          | 576              | 0,04     |          |          |

Tableau 7.4. Expérience 2 : Tableau récapitulatif de l'ANOVA à mesures répétées pour l'erreur spatiale et la vitesse initiale du cube.

## Annexe 7.6.

| Variable<br>dépendante<br>Variable<br>indépendante |        | Stratégie Avant-bras |         |        |         | Stratégie Poignet |         |        |         |
|--|--------|----------------------|---------|--------|---------|-------------------|---------|--------|---------|
|  |        | EC Cube              |         |        | ε Cube  | EC Cube           |         |        | ε Cube  |
|  |        | EC                   | EC Main |        |         | EC                | EC Main |        |         |
|  |        | Avant-bras           | EC Main |        | EC Cube | Avant-bras        | EC Main |        | EC Cube |
| 50<br>Balsa<br>p10                                 | β      | 0,23                 | 0,30    | β      | 0,92    | β                 | 0,28    | β      | 0,76    |
|  | t(187) | 2,82                 | 3,75    | t(188) | 31,18   | t(137)            | 3,13    | t(138) | 13,75   |
|  | p      | 0,01                 | <0,001  | p      | 0,00    | p                 | 0,00    | p      | 0,00    |
| 50<br>Balsa<br>0                                   | β      | 0,24                 | 0,32    | β      | 0,94    | β                 | 0,01    | β      | 0,96    |
|  | t(187) | 3,34                 | 4,32    | t(188) | 36,49   | t(137)            | 1,67    | t(138) | 38,87   |
|  | p      | 0,00                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,10    | p      | 0,00    |
| 50<br>Balsa<br>m10                                 | β      | 0,20                 | 0,39    | β      | 0,88    | β                 | 0,23    | β      | 0,80    |
|  | t(187) | 3,00                 | 5,85    | t(188) | 26,06   | t(137)            | 2,67    | t(138) | 15,51   |
|  | p      | 0,00                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,01    | p      | 0,00    |
| 50<br>Alu<br>p10                                   | β      | -0,06                | 0,26    | β      | 0,93    | β                 | -0,06   | β      | 0,93    |
|  | t(187) | -0,66                | 3,06    | t(188) | 29,24   | t(137)            | -0,66   | t(138) | 29,24   |
|  | p      | 0,51                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,51    | p      | 0,00    |
| 50<br>Alu<br>0                                     | β      | 0,44                 | 0,07    | β      | 0,81    | β                 | -0,21   | β      | 0,84    |
|  | t(187) | 6,53                 | 1,03    | t(188) | 18,63   | t(137)            | -2,27   | t(138) | 17,93   |
|  | p      | 0,00                 | 0,30    | p      | 0,00    | p                 | 0,02    | p      | 0,00    |
| 50<br>Alu<br>m10                                   | β      | 0,31                 | 0,46    | β      | 0,71    | β                 | -0,07   | β      | 0,63    |
|  | t(187) | 5,12                 | 7,43    | t(188) | 13,88   | t(137)            | -0,80   | t(138) | 9,41    |
|  | p      | 0,00                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,42    | p      | 0,00    |
| 25<br>Balsa<br>p10                                 | β      | 0,17                 | 0,33    | β      | 0,92    | β                 | 0,15    | β      | 0,91    |
|  | t(187) | 2,24                 | 4,33    | t(188) | 31,65   | t(137)            | 1,81    | t(138) | 26,64   |
|  | p      | 0,03                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,07    | p      | 0,00    |
| 25<br>Balsa<br>0                                   | β      | 0,26                 | 0,37    | β      | 0,97    | β                 | 0,00    | β      | 0,97    |
|  | t(187) | 3,54                 | 5,06    | t(188) | 52,83   | t(137)            | -0,04   | t(138) | 51,07   |
|  | p      | 0,00                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,97    | p      | 0,00    |
| 25<br>Balsa<br>m10                                 | β      | 0,18                 | 0,43    | β      | 0,92    | β                 | 0,07    | β      | 0,85    |
|  | t(187) | 2,46                 | 6,01    | t(188) | 32,43   | t(137)            | 0,76    | t(138) | 18,92   |
|  | p      | 0,01                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,45    | p      | 0,00    |
| 25<br>Alu<br>p10                                   | β      | 0,14                 | 0,34    | β      | 0,92    | β                 | 0,14    | β      | 0,73    |
|  | t(187) | 1,54                 | 3,76    | t(188) | 31,70   | t(137)            | 1,65    | t(138) | 12,64   |
|  | p      | 0,12                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,10    | p      | 0,00    |
| 25<br>Alu<br>0                                     | β      | -0,01                | 0,44    | β      | 0,89    | β                 | 0,12    | β      | 0,86    |
|  | t(187) | -0,16                | 5,20    | t(188) | 27,24   | t(137)            | 1,32    | t(138) | 20,16   |
|  | p      | 0,87                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,19    | p      | 0,00    |
| 25<br>Alu<br>m10                                   | β      | -0,09                | 0,53    | β      | 0,72    | β                 | 0,22    | β      | 0,66    |
|  | t(187) | -1,02                | 6,37    | t(188) | 14,29   | t(137)            | 2,46    | t(138) | 10,30   |
|  | p      | 0,31                 | 0,00    | p      | 0,00    | p                 | 0,02    | p      | 0,00    |

Tableau 7.5. Expérience 2 : Synthèse de l'analyse en piste causale pour le contrôle de l'énergie cinétique en fonction des conditions et des groupes de stratégie motrice. Même tableau que le Tableau 4.2.3 dans le corps du texte de la thèse, mais avec le détail des valeurs t et p (en rouge quand elles sont significatives au seuil  $\alpha = 0.05$ ). Pour les régressions multiples où les deux valeurs  $\beta$  sont significatives, les valeurs  $\beta$  descriptivement plus importantes sont dans des cases en jaune.

## Annexe 7.7.

| Variable dépendante<br>Variable indépendante |         | Stratégie Avant-bras     |                                     |                                 |                                   |         |         | Stratégie Poignet        |                                     |                                 |                                   |        |         |        |
|--|---------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|--------|
|  |         | V Cube                   |                                     |                                 |                                   | E Cube  | EC Cube | V Cube                   |                                     |                                 |                                   | E Cube | EC Cube |        |
|  |         | V <sub>r</sub><br>impact | $\alpha$ <sub>r</sub><br>trajectory | $\alpha$ <sub>r</sub><br>impact | $\epsilon$ <sub>r</sub><br>impact |         |         | V <sub>r</sub><br>impact | $\alpha$ <sub>r</sub><br>trajectory | $\alpha$ <sub>r</sub><br>impact | $\epsilon$ <sub>r</sub><br>impact |        |         |        |
|  |         |                          |                                     |                                 |                                   | $\beta$ | t       |                          |                                     |                                 |                                   | p      | $\beta$ | t      |
| 50   | $\beta$ | 0.39                     | -0.12                               | 0.18                            | -0.24                             | $\beta$ | 0.92    | $\beta$                  | 0.34                                | -0.18                           | 0.19                              | 0.16   | $\beta$ | 0.76   |
| Balsa  | t(185)  | 5.42                     | -1.75                               | 2.59                            | -3.31                             | t(188)  | 31.77   | t(135)                   | 4.10                                | -2.24                           | 2.30                              | 1.93   | t(138)  | 13.76  |
| p10  | p       | <0.001                   | 0.08                                | 0.01                            | <0.001                            | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.03                            | 0.02                              | 0.06   | p       | <0.001 |
| 50   | $\beta$ | 0.52                     | -0.27                               | 0.40                            | -0.06                             | $\beta$ | 0.94    | $\beta$                  | 0.24                                | -0.19                           | 0.35                              | 0.11   | $\beta$ | 0.96   |
| Balsa  | t(185)  | 6.61                     | -3.91                               | 4.98                            | -0.84                             | t(188)  | 37.52   | t(135)                   | 2.71                                | -2.29                           | 3.75                              | 1.37   | t(138)  | 39.62  |
| 0  | p       | <0.001                   | <0.001                              | <0.001                          | 0.40                              | p       | <0.001  | p                        | 0.01                                | 0.02                            | <0.001                            | 0.17   | p       | <0.001 |
| 50   | $\beta$ | 0.46                     | -0.19                               | 0.27                            | 0.06                              | $\beta$ | 0.88    | $\beta$                  | 0.48                                | -0.08                           | 0.09                              | -0.03  | $\beta$ | 0.81   |
| Balsa  | t(185)  | 6.30                     | -2.55                               | 3.54                            | 0.82                              | t(188)  | 25.93   | t(135)                   | 6.15                                | -0.97                           | 1.12                              | -0.38  | t(138)  | 16.44  |
| m10  | p       | <0.001                   | 0.01                                | <0.001                          | 0.41                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.33                            | 0.26                              | 0.71   | p       | <0.001 |
| 50   | $\beta$ | 0.30                     | -0.12                               | 0.22                            | -0.14                             | $\beta$ | 0.89    | $\beta$                  | 0.42                                | 0.05                            | 0.20                              | -0.01  | $\beta$ | 0.93   |
| Alu  | t(185)  | 3.61                     | -1.70                               | 2.65                            | -1.81                             | t(188)  | 27.16   | t(135)                   | 5.03                                | 0.62                            | 2.21                              | -0.09  | t(138)  | 29.45  |
| p10  | p       | <0.001                   | 0.09                                | 0.01                            | 0.07                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.54                            | 0.03                              | 0.93   | p       | <0.001 |
| 50   | $\beta$ | 0.37                     | -0.11                               | 0.10                            | -0.03                             | $\beta$ | 0.82    | $\beta$                  | 0.45                                | -0.02                           | 0.24                              | -0.10  | $\beta$ | 0.85   |
| Alu  | t(185)  | 4.52                     | -1.53                               | 1.18                            | -0.32                             | t(188)  | 19.31   | t(135)                   | 5.57                                | -0.22                           | 2.94                              | -1.12  | t(138)  | 18.69  |
| 0  | p       | <0.001                   | 0.13                                | 0.24                            | 0.75                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.83                            | <0.001                            | 0.26   | p       | <0.001 |
| 50   | $\beta$ | 0.60                     | -0.12                               | 0.39                            | -0.05                             | $\beta$ | 0.73    | $\beta$                  | 0.52                                | -0.04                           | 0.07                              | -0.12  | $\beta$ | 0.65   |
| Alu  | t(185)  | 8.42                     | -1.76                               | 4.90                            | -0.70                             | t(188)  | 14.53   | t(135)                   | 6.10                                | -0.50                           | 0.84                              | -1.54  | t(138)  | 10.06  |
| m10  | p       | <0.001                   | 0.08                                | <0.001                          | 0.49                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.62                            | 0.40                              | 0.13   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.51                     | -0.26                               | 0.10                            | -0.04                             | $\beta$ | 0.92    | $\beta$                  | 0.47                                | -0.21                           | 0.46                              | 0.05   | $\beta$ | 0.90   |
| Balsa  | t(185)  | 7.50                     | -3.90                               | 1.43                            | -0.58                             | t(188)  | 32.11   | t(135)                   | 5.57                                | -2.67                           | 5.22                              | 0.68   | t(138)  | 24.57  |
| p10  | p       | <0.001                   | <0.001                              | 0.15                            | 0.56                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.01                            | <0.001                            | 0.50   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.44                     | -0.33                               | 0.35                            | 0.09                              | $\beta$ | 0.97    | $\beta$                  | 0.44                                | -0.25                           | 0.38                              | 0.19   | $\beta$ | 0.97   |
| Balsa  | t(185)  | 7.18                     | -5.02                               | 5.25                            | 1.49                              | t(188)  | 5.58    | t(135)                   | 6.11                                | -3.56                           | 5.01                              | 2.62   | t(138)  | 45.53  |
| 0  | p       | <0.001                   | <0.001                              | <0.001                          | 0.14                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | <0.001                          | <0.001                            | 0.01   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.46                     | -0.29                               | 0.22                            | 0.08                              | $\beta$ | 0.91    | $\beta$                  | 0.51                                | -0.05                           | 0.26                              | -0.13  | $\beta$ | 0.86   |
| Balsa  | t(185)  | 7.35                     | -4.38                               | 3.30                            | 1.23                              | t(188)  | 30.94   | t(135)                   | 6.43                                | -0.62                           | 2.85                              | -1.64  | t(138)  | 19.37  |
| m10  | p       | <0.001                   | <0.001                              | 0.001                           | 0.22                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.54                            | 0.01                              | 0.10   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.47                     | -0.11                               | 0.08                            | -0.09                             | $\beta$ | 0.91    | $\beta$                  | 0.37                                | -0.12                           | 0.16                              | 0.22   | $\beta$ | 0.71   |
| Alu  | t(185)  | 6.59                     | -1.64                               | 1.05                            | -1.19                             | t(188)  | 30.01   | t(135)                   | 4.67                                | -1.48                           | 1.74                              | 2.46   | t(138)  | 11.78  |
| p10  | p       | <0.001                   | 0.10                                | 0.30                            | 0.24                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.14                            | 0.09                              | 0.01   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.56                     | -0.27                               | 0.01                            | -0.03                             | $\beta$ | 0.90    | $\beta$                  | 0.45                                | -0.08                           | 0.30                              | -0.03  | $\beta$ | 0.86   |
| Alu  | t(185)  | 9.53                     | -4.69                               | 0.20                            | -0.56                             | t(188)  | 27.74   | t(135)                   | 5.16                                | -0.90                           | 2.78                              | -0.25  | t(138)  | 20.14  |
| 0  | p       | <0.001                   | <0.001                              | 0.84                            | 0.58                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.37                            | 0.01                              | 0.80   | p       | <0.001 |
| 25   | $\beta$ | 0.65                     | -0.22                               | 0.19                            | <0.001                            | $\beta$ | 0.73    | $\beta$                  | 0.54                                | -0.1                            | -0.04                             | 0.01   | $\beta$ | 0.68   |
| Alu  | t(185)  | 10.65                    | -3.86                               | 3.13                            | -0.01                             | t(188)  | 14.71   | t(135)                   | 7.11                                | -1.17                           | -0.53                             | 0.07   | t(138)  | -10.63 |
| m10  | p       | <0.001                   | <0.001                              | 0.002                           | 0.99                              | p       | <0.001  | p                        | <0.001                              | 0.24                            | 0.59                              | 0.94   | p       | <0.001 |

Tableau 7.6. Expérience 2 : Synthèse de l'analyse en piste causale pour déterminer l'erreur spatiale en fonction de la vitesse du cube qui dépend d'un ensemble de paramètres cinématiques pour chaque stratégie motrice. Même tableau que le Tableau 4.2.4. dans le corps du texte de la thèse, mais avec le détail des valeurs  $t$  et  $p$ . Tableau des valeurs de coefficient standardisé  $\beta$ , avec en rouge les valeurs positives et en bleu les valeurs négatives, quand elles sont significatives au seuil  $\alpha = 0.05$ .

## Annexe 7.8.

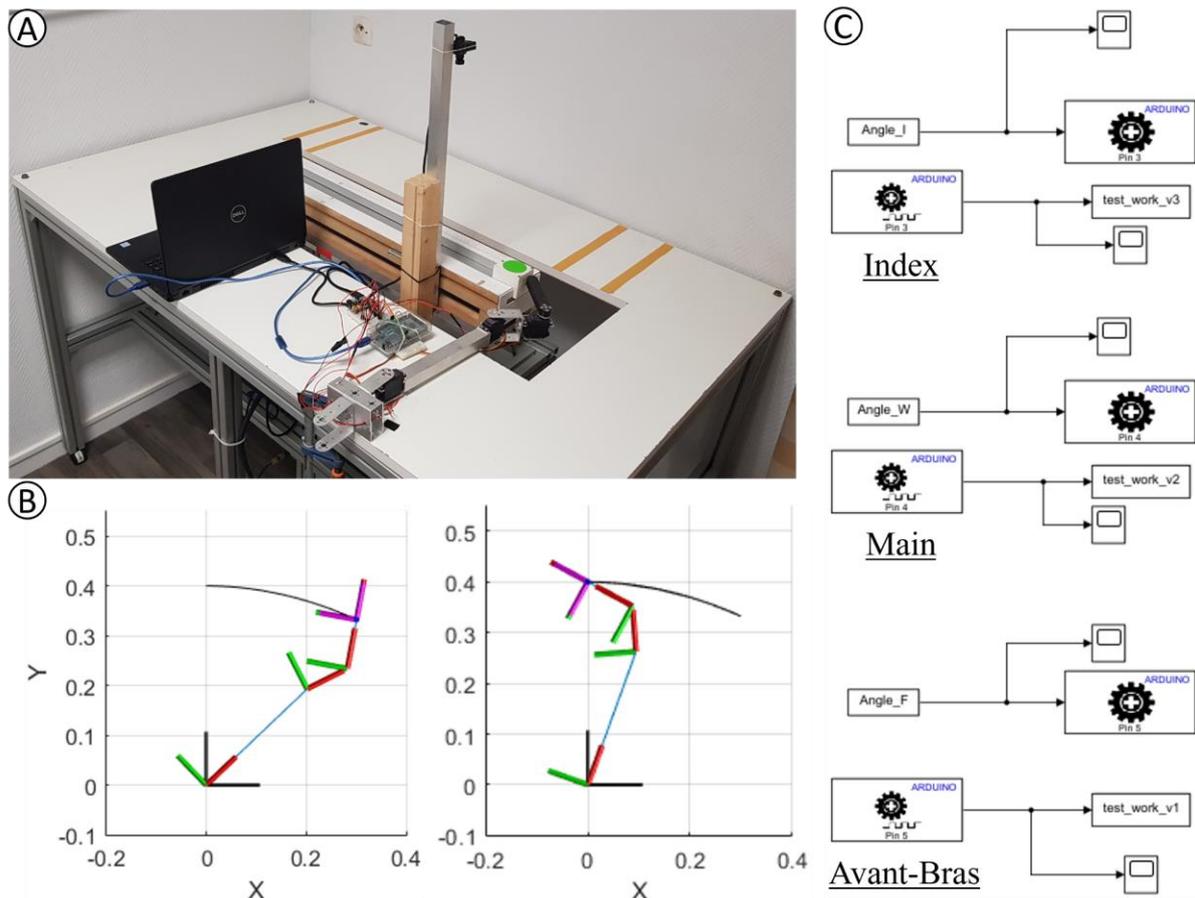
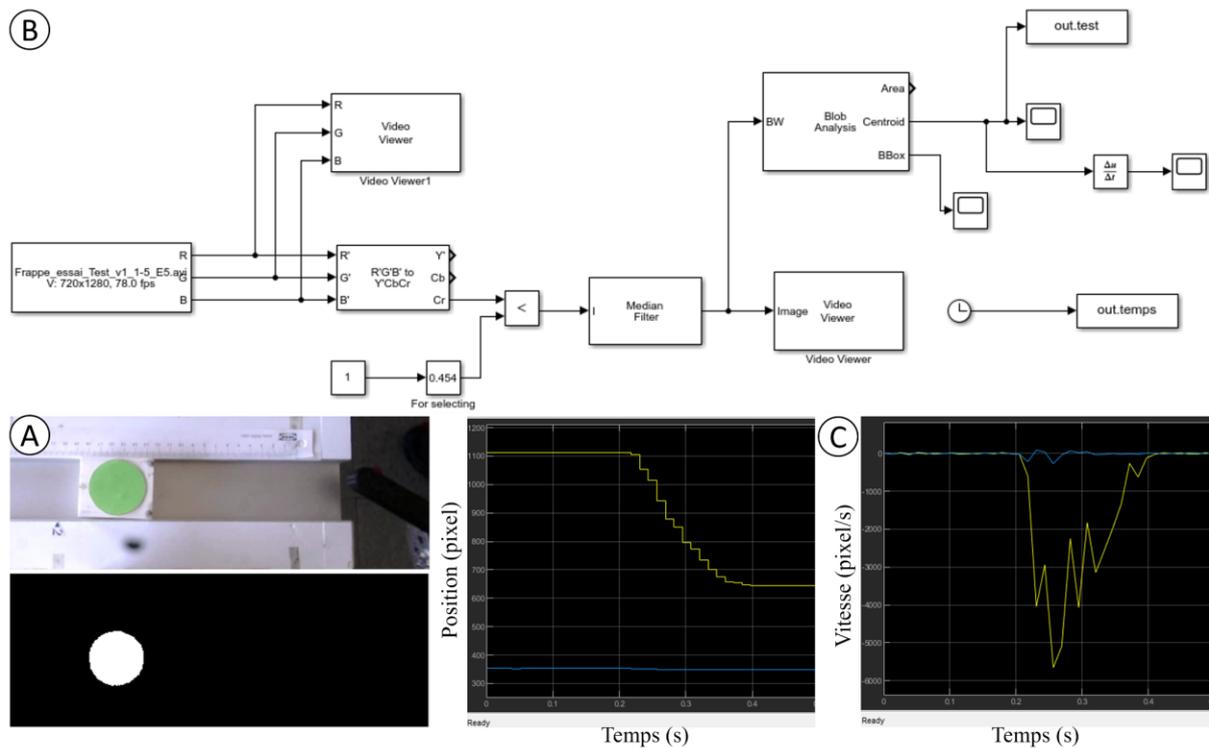


Figure 7.2. (A) Bras robotisé commandé par un PC via une carte arduino. Au sommet d'une potence, une caméra haute fréquence (120Hz) filme le déplacement du cube. (B) Dans le script, un modèle de corps rigide à trois segments (index, main, avant-bras) est créé. Ensuite, les positions articulaires au cours du temps sont déterminées grâce à la cinématique inverse à partir de la trajectoire et des limitations angulaires afin de reproduire le mouvement de la stratégie avant-bras. (C) Pour faire bouger les trois segments en même temps, la position articulaire est importée dans Simulink puis transmise aux servomoteurs grâce à des blocs spécifiques à arduino. Les retours de positions effectuées par les servomoteurs en temps réel sont aussi récupérés pour les afficher.



**Figure 7.3.** Suivi de la trajectoire de l'objet lancé. (A) A partir de la vidéo du déplacement du cube, un gradient de couleur à chaque image est appliqué afin de créer une image en contraste pour isoler la pastille verte qui devient blanche grâce au bloc simulink (B). Ensuite le bloc "Blob analysis" traque la centroïde de la pastille blanche, ce qui permet d'obtenir la position et la vitesse du cube au cours du temps (C).