UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT
DROIT D'AUTEUR

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document. Toute contrefaçon, plagiat ou reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
34 COURS LÉOPOLD — CS 25233
54052 NANCY CEDEX
WWW.UNIV-LORRAINE.FR

École Doctorale Sociétés, Langages, Temps, Connaissances (SLTC)
Laboratoire Lorrain de Psychologie et Neurosciences de la Dynamique des Comportements (2LPN)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Mention : Psychologie

par **Michel PFAFF**

Sous la direction de Valérie Saint-Dizier de Almeida, Vincent Monfort et Matthieu Casteran

Relation entre perception du temps et organisation motrice d'un mouvement polyarticulaire

30 janvier 2026

Membres du jury :

Valérie Doyère - Directrice de recherche, Institut des Neurosciences Paris-Saclay (NeuroPSI), CNRS-UMR 9197	Présidente de jury et examinatrice
Sophie Herbst - Chargée de recherche (HDR), CEA, DRF/Joliot, NeuroSpin, INSERM, Cognitive Neuroimaging Unit, Gif-sur-Yvette	Rapporteure
Thomas Hinault - Chargé de recherche (HDR), INSERM U1077, Caen	Rapporteur
Valérie Saint-Dizier de Almeida - Professeure des universités, Université de Lorraine, 2LPN, Nancy	Directrice de thèse

Membres invités

Vincent Monfort - Neuropsychologue (HDR), Université de Lorraine, 2LPN, Nancy	Co-directeur de thèse
Matthieu Casteran - Maître de Conférences, Université de Lorraine, DevAH, Nancy	Co-directeur de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier Valérie Saint-Dizier de Almeida, Vincent Monfort et Matthieu Casteran pour leur encadrement bienveillant, leurs conseils éclairés et leur soutien constant tout au long de ce travail.

Je remercie Micha Pfeuty et Elizabeth Thomas pour leur accompagnement, leurs discussions enrichissantes et leur soutien pour les expérimentations que nous avons menées ensemble.

Je remercie Prof. Dr. Axel Mecklinger, Dr. Véronique Huffer, Lisa Festag, Dorüntine Zogaj, Dr. Regine Bader, Dr. Julia Messmer, Nina Hort et Robert Schmidt du laboratoire « Arbeitseinheit Experimentelle Neuropsychologie » à Sarrebruck (DE), pour leurs échanges scientifiques stimulants, le cadre de travail bienveillant et leurs collaborations enrichissantes.

Je tiens également à remercier mes collègues du laboratoire 2LPN, en particulier Hélène Maire, Blandine Hubert, Jérôme Dinet et Maxime Mastagli.

Parmi les personnes avec qui j'ai eu le privilège de collaborer, je souhaite aussi remercier chaleureusement Jean Pauly pour son soutien et les discussions riches et variées.

Je remercie Lilian Fautrelle et Anne Pignault d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi individuel, ainsi que pour leurs conseils éclairés.

Je remercie les rapporteurs et les membres du jury pour le temps et l'intérêt qu'ils ont consacré à évaluer ce travail de thèse.

Je remercie toutes les personnes non citées mais dont l'aide, les discussions ou la présence ont, d'une manière ou d'une autre, contribué à la réalisation de cette thèse.

Je remercie chaleureusement ma famille, en particulier mes parents, pour leur appui indéfectible et leur présence bienveillante à chaque étape de ce parcours.

Je suis profondément reconnaissant envers mon épouse, dont le soutien et la compréhension ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail de thèse.

À ma fille, je dédie une pensée pleine de tendresse pour la joie quotidienne qu'elle m'a apportée, et qui a illuminé mes journées ainsi que ce travail.

« Il est fort dangereux, Frodon, de sortir de chez soi, on prend la route et si on ne regarde pas où l'on met les pieds, on ne sait pas jusqu'où cela peut nous mener." J.R.R. Tolkien

Sommaire

Liste des figures .....

Liste des tableaux .....

Liste des équations .....

Liste des annexes .....

Liste des abréviations .....

Introduction 1

Chapitre 1 : Cadre théorique 7

1.1. La perception du temps 8

1.1.1. Les propriétés psychophysiques de l'estimation temporelle 13

1.1.2. Théories de l'horloge interne 14

1.1.2.1. Modèle de l'horloge interne 14

1.1.2.2. Théorie du temps scalaire 16

1.1.2.3. Théorie de la porte attentionnelle 18

1.1.3. Neurophysiologie de l'estimation temporelle 20

1.1.3.1. Horloge interne et corrélat neurophysiologique 20

1.1.3.2. Modèles neurocomputationnels 21

1.1.4. Le cadre bayésien 25

1.2. Relation entre perception du temps et mouvement 26

1.2.1. Evidences neurophysiologiques de l'interaction perception du temps et mouvement 28

1.2.2. Une relation dynamique entre la perception du temps et le mouvement . 31
1.2.2.1. Temps et mouvement selon la théorie du temps scalaire 33
1.2.2.2. Temps et mouvement selon la combinaison bayésienne d'indices 36
1.2.3. L'influence de différents effecteurs 40
1.3. Contrôle moteur et objectif temporel 41
1.3.1. Le mouvement d'atteinte du corps entier 42
1.3.2. Théorie du contrôle moteur 45
1.3.2.1. Modèle interne en boucle fermée 45
1.3.2.2. Modèle interne en boucle ouverte 45
1.3.2.3. Modèle hybride du contrôle continu 46
1.3.3. Contrôle moteur et perception du temps 49
Chapitre 2 : Problématiques, objectifs et hypothèses 53
2.1. Synthèse du cadre théorique et problématique 54
2.2. Objectifs et hypothèses 57
Chapitre 3 : Contributions expérimentales 60
3.1. Méthodologie Générale 61
3.1.1. Cadre du projet doctoral 61
3.1.2. Considération éthique 62
3.2. Expérimentation 1 63
3.2.1. Matériel et méthode 64
3.2.1.1. Participants 64
3.2.1.2. Dispositif expérimental et procédure 65

3.2.2. Étude 1 : Des mouvements des doigts aux mouvements du corps entier : comment le type de mouvement influence notre perception du temps 68

3.2.2.1. Collecte et traitement des données 70

3.2.2.2. Analyses statistiques 71

3.2.2.3. Résultats 72

3.2.2.4. Discussion 74

3.2.2.5. Conclusion 80

3.2.3. Étude 2 : Se déplacer à temps : objectifs temporels dans les mouvements d'atteintes du corps entier 81

3.2.3.1. Collecte des données 83

3.2.3.2. Traitement des données 85

3.2.3.3. Analyses statistiques 88

3.2.3.4. Résultats 88

3.2.3.5. Discussion 93

3.2.3.6. Conclusion 96

3.2.4. Étude 3 : Mouvements d'atteintes du corps entier contraint temporellement 97

3.2.4.1. Collecte des données 97

3.2.4.2. Traitement des données 97

3.2.4.3. Analyses statistiques 98

3.2.4.4. Résultats 99

3.2.4.5. Discussion 108

3.2.4.6. Conclusion 112

3.3. Expérimentation 2 : Capacité prédictive des performances du jugement temporel sur la performance sensorimotrice 113

3.3.1. Matériel et méthode 116

3.3.1.1. Participants 116

3.3.1.2. Dispositif expérimental et procédure 117

3.3.1.3. Collecte et traitement des données 122

3.3.1.4. Analyses statistiques 125

3.3.2. Résultats 126

3.3.2.1. IRT 126

3.3.2.2. Capacité prédictive de l'IRT 127

3.3.2.3. Reproduction temporelle en fonction du mouvement 129

3.3.3. Discussion 131

3.3.3.1. Capacité prédictive de l'IRT 131

3.3.3.2. Reproduction temporelle en fonction du mouvement 133

3.3.4. Conclusion 135

Chapitre 4 : Discussion Générale 137

4.1. Rappel des objectifs 138

4.2. Perception du temps et mouvement 139

4.3. Contrôle moteur et perception du temps 144

Chapitre 5 : Conclusion et perspectives 149

Références bibliographiques 154

Annexes 196

Résumé 201

Abstract 202

Liste des figures

Figure 1 : Les échelles de temps du jugement temporel 8

Figure 2 : Une taxonomie fonctionnelle du timing proposée par Coull et Nobre (2008) 11

Figure 3 : Modèle d'horloge interne proposé par Treisman (1963) (figure adaptée de Treisman, 1963)..... 15

Figure 4 : Une métaphore du traitement de l'information de la théorie du temps scalaire (figure adaptée de Church, 2003)..... 17

Figure 5 : Modèle de la porte attentionnelle (figure adaptée de Zakay & Block, 1995)..... 19

Figure 6 : Structures neuronales impliquées dans la perception temporelle 22

Figure 7 : Les meilleurs synchroniseurs présentent une réponse cérébrale plus marquée aux stimuli déviants. 33

Figure 8 : Mouvement d'atteinte du corps entier..... 44

Figure 9 : Modèle hybride du contrôle continu..... 47

Figure 10 : Précision temporelle et variabilité entre les durées et les mouvements..... 74

Figure 11 : Mouvement d'atteinte du corps entier 84

Figure 12 : Schémas cinématiques du mouvement d'atteinte du corps entier 87

Figure 13 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires (APA) des mouvements d'atteinte du corps entier sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp).. 89

Figure 14 : Latence des ajustements posturaux anticipatoires des mouvements d'atteinte du corps entier sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp). 90

Figure 15 : Vitesse moyenne du doigt lors du mouvement d'atteinte du corps entier avec et sans objectif temporel 92

Figure 16 : Angles d'élévation (degrés) des différents segments du corps lors d'un mouvement d'extension du corps entier à vitesse naturelle sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp). 93
Figure 17 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour chaque muscle pour la durée très courte en fonction des performances 104
Figure 18 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour chaque muscle pour la durée moyenne en fonction des performances. 106
Figure 19: Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour le deltoïde postérieur pour la durée très longue en fonction des performances. 108
Figure 20 : Tâche de synchronisation-continuation 118
Figure 21 : Tâche d'écoute passive 119
Figure 22 : Tâche de reproduction temporelle 121
Figure 23 : N1 et P2 moyen des stimuli déviants et standards à Cz 127
Figure 24 : Précision temporelle et variabilité entre les durées et les mouvements..... 130

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse descriptive de la précision et variabilité temporelle en fonction de la durée et du mouvement 73

Tableau 2 : Analyse post-hoc des amplitudes des ajustements posturaux anticipés en fonction des durées cibles 101

Tableau 3 : Analyse post-hoc des latences des ajustements posturaux anticipés en fonction des durées cibles 102

Tableau 4 : Analyse post-hoc des paramètres cinématiques du doigt, du centre de masse (CoM) et de la structure géométrique du mouvement, en fonction des durées cibles 103

Tableau 5 : Analyse post hoc pour la durée très courte en fonction des performances 105

Tableau 6 : Analyse post hoc pour la durée moyenne en fonction des performances 107

Tableau 7 : Corrélation entre l'IRT et le CV d'une tâche de reproduction temporelle 128

Tableau 8 : Corrélation entre le l'IRT et le ratio IR/IC d'une tâche de reproduction temporelle 128

Tableau 9 : Analyse descriptive de la précision et variabilité temporelle en fonction de la durée et du mouvement 130

Liste des équations

Équation 1 : Ratio IR/IC 70

Équation 2 : Coefficient de variation 71

Equation 3 : Taille d'effet de type d (d-like en anglais) 72

Équation 4 : Normalisation de l'amplitude des ajustements posturaux anticipés 86

Équation 5 : Calcul de la précision moyenne pour une tache de synchronisation 124

Équation 6 : Calcul des erreurs absolues de synchronisation 124

Équation 7 : Calcul du coefficient de variation des erreurs absolues de synchronisation 124

Liste des annexes

Annexe 1 : Acceptation pour publication dans la revue Psychological Research ……197

Annexe 2 : Analyse complémentaire de l'expérimentation 2……..……198

Annexe 3 : Pfaff et Casteran (2024) ……200

Liste des abréviations

ACP	Analyse par Composante Principale
AMS	Aire Motrice Supplémentaire
APAs	Ajustements Posturaux Anticipés
CoM	Centre de masse
CBI	Combinaison Bayésienne d'Indices
CNV	Variation Négative Contingente (*Contingent Negative Variation* en anglais)
CV	Coefficient de variation
EEG	Electroencéphalographie
EMG	Electromyographie
GB	Ganglions de la Base
GLM	Modèle linéaire général
IC	Intervalle Cible
IR	Intervalle Reproduit
IRT	Indice de Réponse Temporelle
LMM	Modèle linéaire à effet mixte (*Linear Mixed Model* en anglais)
MP	Maladie de Parkinson
Ratio IR/IC	Ratio Intervalle Reproduit/ Intervalle Cible
RT-Finger	Reproduction Temporelle avec un mouvement de Doigt
RT-WBR	Reproduction Temporelle avec un mouvement d'atteinte du corps entier
TTS	Théorie du Temps Scalaire
WBR	Mouvement d'atteinte du corps entier (*Whole-Body Reaching* en anglais)
WBR-Max	Mouvement d'atteinte du corps entier à vitesse maximale
WBR-Nat	Mouvement d'atteinte du corps entier à vitesse naturelle
WBR-Temp	Mouvement d'atteinte du corps entier contraint temporellement à vitesse naturelle

Introduction

« Le temps devient temps humain dans la mesure où il est articulé de manière narrative ; en retour le récit est significatif dans la mesure où il dessine les traits de l'expérience temporelle » Paul Ricoeur

Depuis l'Antiquité, le temps est un objet de réflexion pour l'être humain. Platon suggéra, par exemple, que le temps est l'image mobile de l'éternité, tandis qu'Aristote le concevait comme le nombre du mouvement selon l'antérieur (i.e., futur) et le postérieur (i.e., passé). Ces premières réflexions inscrivaient déjà le temps dans une double dimension : d'une part, la mesure objective du changement, et d'autre part, l'expérience subjective du temps. Augustin suggéra plus tard que le temps ne se situe pas dans le monde, mais dans l'âme. Plus tard encore, Edmund Husserl proposa que la conscience constitue le flux temporel par la rétention du passé immédiat et la protention de l'avenir proche. Ainsi, la philosophie prépara le terrain à une problématique centrale lorsqu'on s'intéresse à la perception du temps : comment les êtres vivants (e.g., humains et non-humains) perçoivent-ils le temps ?

Les premiers éléments de réponse à cette question furent apportés à la fin du XIX^{e} siècle par des expériences, comme celles menées par Karl Vierordt, qui étudia la perception du temps sous différentes facettes dans son livre 'Der Zeitsinn' en 1868. Un siècle plus tard, en 1983, une conférence organisée à New York marqua un tournant important dans l'étude de la perception du temps en réunissant des chercheurs issus de différents domaines (Gibbon & Allan, 1984). Cette rencontre permit aux chercheurs étudiant la perception du temps chez l'humain et les non-humains de partager leurs résultats et leurs investigations. Elle mena ensuite à un renforcement des études, aussi bien en psychologie expérimentale qu'en neurosciences. L'ensemble de ces travaux converge et indique que le traitement temporel est une composante centrale de la cognition et du comportement humain.

Le traitement temporel permet aux individus de détecter, anticiper et s'adapter aux changements de l'environnement, en soutenant des comportements orientés vers un but. Dans la vie quotidienne, cela s'illustre à travers des actions en apparence simples, telles que traverser une rue fréquentée, attraper un objet en mouvement, estimer la vitesse d'un véhicule pour freiner à temps ou décider du bon moment pour traverser avant que le feu ne passe au rouge.

Ces comportements exigent des organismes qu'ils effectuent des mesures temporelles précises des informations sensorielles et qu'ils adaptent leurs réponses motrices en fonction des contraintes temporelles (De Kock et al., 2021). Ce couplage temps-mouvement est fondamental à plusieurs niveaux organisationnels du système nerveux, allant des réflexes spinaux aux séquences motrices complexes (Franklin & Wolpert, 2011). Toutefois, l'étude de l'interaction entre le mouvement et la perception du temps a été peu approfondie jusqu'à récemment (pour revue : Balasubramaniam et al., 2021; De Kock et al., 2021), alors que celle-ci avait déjà été étudié par Karl Vierordt en 1866 : « Unsere nächste Aufgabe wird also sein, die mannigfaltigen Leistungen des Zeitsinnes zu verfolgen, wie sie wenigstens in den wichtigsten Sinnesgebieten, sowie in der Ausführung von willkürlichen Bewegung und endlich in der blossen Vorstellung von Zeitgrössen sich kundgeben. » (*Der Zeitsinn : Nach Versuchen von Karl Vierordt* ; traduit en français : *« Notre prochaine tâche sera donc de suivre les diverses performances du sens du temps, telles qu'elles se manifestent au moins dans les domaines sensoriels les plus importants, ainsi que dans l'assimilation de mouvements volontaires et enfin dans la simple représentation de grandeurs temporelles. »*). Cette interaction est aujourd'hui soutenue par des données neurophysiologiques et comportementales récentes. Des études d'imagerie cérébrale montrent, par exemple, que le traitement temporel et le contrôle moteur recrutent des réseaux neuronaux communs, comme l'aire motrice supplémentaire (AMS ; e.g., Coull et al., 2016). Sur le plan clinique, cette interaction est notamment illustrée par les effets bénéfiques de la stimulation rythmique externe sur la marche des patients atteints de la maladie de Parkinson (MP), qui améliore la régularité du mouvement (e.g., Bella et al., 2017). Sur le plan comportemental, il a été démontré, par exemple, que le mouvement peut moduler activement la perception du temps. Ainsi, des mouvements du bras réduisent la variabilité temporelle (e.g., Wiener et al., 2019). Le mouvement influence également la précision du jugement temporel (e.g., une représentation subjective du temps proche de la durée réelle, ou la capacité à reproduire un intervalle de temps

proche de la durée cible). En fonction du contexte, les mouvements peuvent soit dilater (e.g., Allingham et al., 2021 ; Castellotti et al., 2022), soit compresser (e.g., Tomassini et al., 2014 ; Yokosaka et al., 2015) le temps perçu. Réciproquement, le traitement temporel est nécessaire et utile à la motricité afin de s'adapter à un environnement changeant (e.g., Balasubramaniam et al., 2021; D'Andrea-Penna et al., 2020; Todorov, 2004). Malgré les avancées dans ce domaine, la majorité des recherches sur la perception du temps s'est concentrée sur des tâches motrices simples impliquant des mouvements mono- ou bi-articulaires, comme l'appui sur un bouton avec le doigt ou un mouvement de bras. À l'inverse, les mouvements poly-articulaires du corps entier, pourtant plus représentatifs des actions motrices de la vie quotidienne (e.g., ramasser un objet au sol), demeurent largement sous-étudiés (pour revue De Kock et al., 2021).

Parallèlement, dans le champ du contrôle moteur, les recherches sur les mouvements du corps entier, et notamment sur les tâches d'atteinte, se sont essentiellement focalisées sur la régulation des objectifs spatiaux du mouvement. Ces études se sont intéressées à la préparation et à l'exécution du mouvement polyarticulaire, en particulier à travers l'étude des ajustements posturaux anticipés (APAs), dont l'organisation spatio-temporelle est modulée par des paramètres tels que la direction (Aruin & Latash, 1995), l'amplitude (Aruin & Shiratori, 2004), la précision spatiale (Bertucco & Cesari, 2010; Bonnetblanc et al., 2004) ou encore la vitesse (Horak et al., 1984; Shiratori & Aruin, 2007). Par ailleurs, l'analyse cinématique de l'exécution du mouvement révèle des stratégies motrices spécifiques en fonction de l'amplitude, de la direction et de la vitesse (e.g., Berret et al., 2009; Casteran et al., 2013). Bien que le temps semble être inexorablement lié au mouvement – car pour qu'un mouvement ait lieu, la précision temporelle est nécessaire d'une part pour assurer la coordination entre les membres, mais aussi pour interagir avec l'environnement et donc par exemple nous permettre d'atteindre une cible au juste moment (Todorov, 2004) – la prise en compte explicite d'objectifs temporels dans ces paradigmes reste sous-explorée. Or, pour optimiser un comportement orienté vers un but dans

un environnement changeant, il est essentiel non seulement de savoir où agir, mais aussi quand agir. Bien que certaines études se soient intéressées à des objectifs de vitesse variés (e.g., effectuer un mouvement d'atteinte du corps entier (Whole Body Reaching *en anglais* (WBR)) rapidement, naturellement ou lentement ; Casteran et al., 2013), très peu d'études ont examiné la capacité à adapter un mouvement en fonction d'une durée cible prédéfinie (e.g., reproduire une durée cible instruite de 1,5 seconde). Les travaux d'Esposti et al. (2015) sont particulièrement intéressants, car bien qu'il soit établi que la latence des APAs varie selon la vitesse du mouvement (Horak et al., 1984; Lee et al., 1987; Shiratori & Aruin, 2007), ces auteurs montrent que c'est l'intention de vitesse (i.e., l'objectif temporel) qui détermine cette modulation, plutôt que la vitesse réellement réalisée. Cela suggère que les objectifs temporels sont intégrés dès les premières phases de la préparation motrice, invitant à reconsidérer les modèles actuels du contrôle moteur, qui modélisent principalement les objectifs spatiaux.

L'étude des interactions entre la perception du temps et le mouvement du corps entier, ainsi que l'impact des objectifs temporels sur les stratégies motrices, demeure ainsi largement inexplorée. Le présent travail de recherche vise à étudier ces points à travers quatre objectifs :

- Premier objectif (Expérimentation 1 – Etude 1) : examiner dans quelle mesure les mouvements de WBR modulent la perception du temps, en comparaison avec des mouvements du doigt, dans une tâche de reproduction temporelle.
- Deuxième objectif (Expérimentation 1 – Etude 2) : comparer les stratégies motrices lors de mouvements de WBR exécutés avec ou sans contrainte temporelle explicite, pour une durée de mouvement identique.
- Troisième objectif (Expérimentation 1 – Etude 3) : étudier les stratégies motrices d'un mouvement de WBR en fonction de différentes durées explicites dans une tâche de reproduction temporelle.

- Quatrième objectif (Expérimentation 2 – Etude 1) : examiner dans quelle mesure la capacité individuelle du jugement temporel, telle que capturée par l'IRT, peut prédire la performance temporelle dans différentes tâches de timing moteur.

Chapitre 1 : Cadre théorique

« Apprendre les langues prend énormément de temps, et il en est de même pour toutes les choses que l'on veut connaître. » J. R. R. Tolkien

1.1. La perception du temps

Dans l'étude de la perception du temps, une distinction initiale et majeure concerne les échelles de temps étudiées, car elles mobilisent des mécanismes distincts pour traiter l'information temporelle : microsecondes, millisecondes, secondes ou rythmes circadiens (voir Figure 1 ; Merchant & de Lafuente, 2014).

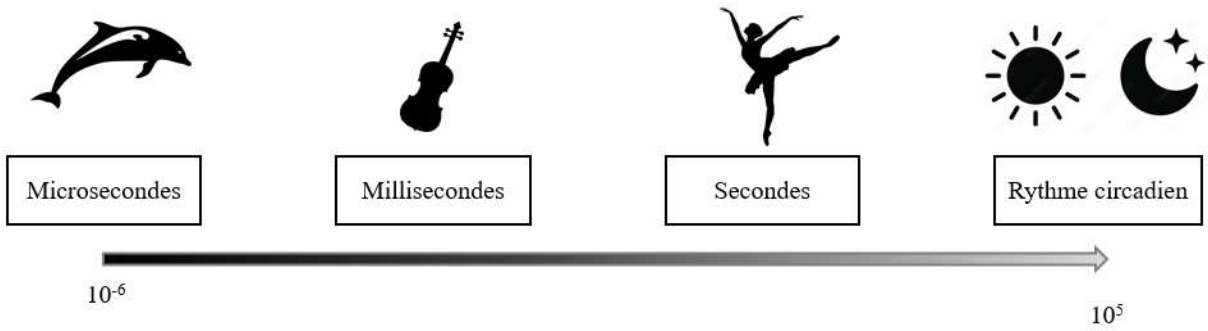


Figure 1 : Les échelles de temps du jugement temporel

Illustration des différentes échelles temporelles pertinentes pour l'étude la perception du temps, allant des microsecondes aux rythmes circadiens, sur une échelle logarithmique qui s'étend de 10^{-6} secondes (microsecondes) à 10^{5} secondes (1 jour). Figure inspirée de Merchant & de Lafuente (2014).

Le traitement de l'information temporelle à l'échelle des microsecondes joue un rôle clé dans l'audition binaurale et l'écholocation. Dans l'audition binaurale, le système auditif exploite les délais interauraux (600 à 700 µs) pour localiser les sons, via des circuits spécialisés du tronc cérébral. L'écholocation, en revanche, est un processus auditif actif : les chauves-souris et les dauphins émettent un son et analysent l'écho pour détecter et localiser des cibles. Les signaux d'écholocation permettent une estimation très précise des délais entre impulsion et écho (600 à 12000 µs), encodés par des neurones spécialisés du colliculus inférieur.

À l'autre extrémité du continuum, l'horloge circadienne est le système biologique qui régule les rythmes sur 24 heures, en synchronisant les fonctions physiologiques avec les cycles

environnementaux, principalement le cycle lumière-obscurité. Elle remplit deux fonctions essentielles : anticiper les fluctuations quotidiennes pour optimiser les activités biologiques, et séparer les processus incompatibles comme le sommeil et l'alimentation. Chez les mammifères, l'horloge centrale est localisée dans les noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus, et qui agissent comme un relais entre le cycle lumière-obscurité externe et le système temporel endogène.

Entre ces deux extrêmes se trouve la perception des intervalles de temps de quelques millisecondes à plusieurs secondes. La perception des intervalles dans la plage des centaines de millisecondes (200 à 1000 ms) intervient dans un large éventail d'activités, allant de l'interception d'objets et l'évitement de collisions à des comportements complexes tels que la perception et l'articulation du langage, ainsi que la musique et la danse (Merchant, Harrington, et al., 2013). La quantification des intervalles dans une échelle allant de la seconde à la minute est souvent désignée sous le terme de « timing d'intervalle ». Le traitement temporel dans cette plage intervient dans des comportements tels que la prise de décision (Brody et al., 2003) et l'exécution de séquences motrices (Bortoletto et al., 2011). Il convient de souligner que, bien que certains mouvements volontaires puissent être réalisées en quelques centaines de millisecondes, d'autres peuvent s'étendre sur des durées plus longues (e.g., éplucher une pomme, ramasser une caisse au sol). Dans notre cas par exemple, nous nous intéressons aux mouvements d'atteintes du corps entier qui peuvent être effectués entre 700 et 2000 ms (e.g., Casteran et al., 2013). Dès lors, une distinction stricte entre les échelles temporelles intermédiaires (centaines de millisecondes versus secondes) semble devoir être nuancée en fonction de la tâche.

La littérature sur le timing, couvrant des durées allant de quelques centaines de millisecondes à plusieurs secondes, propose une multitude de méthodes pour étudier le temps

perçu, son fonctionnement et ses propriétés. Les différentes méthodes se distinguent toutefois selon qu'il s'agisse de timing prospectif ou rétrospectif.

Hicks et al. (1976) proposent une définition permettant de distinguer le timing prospectif du timing rétrospectif. Dans le cadre du paradigme prospectif, le participant est conscient de devoir estimer le temps. Dans la vie quotidienne, le timing prospectif (i.e., l'estimation du temps) devient pertinent lorsqu'une situation environnementale exige une réponse temporelle précise, comme lorsque vous souhaitez attraper une balle au bon moment, estimer la vitesse de la voiture qui vient en face de vous pour décider si vous devez freiner, ou que vous traversiez une rue en prenant en compte le temps qu'il vous reste avant que le feu passe au rouge. A l'inverse, dans le paradigme rétrospectif, le participant n'est pas informé à l'avance qu'il devra estimer le temps et n'en prend pas conscience. Cela se traduit par des tâches où un individu effectue une activité sans connaître à l'avance qu'il sera amené à juger la durée de celle-ci. Ce type de timing est fréquent dans les situations quotidiennes, comme lorsqu'il s'agit de se souvenir ou de témoigner d'événements passés, d'estimer la durée d'un film après l'avoir apprécié sans avoir consciemment surveillé le temps, ou que vous effectuez une activité sans devoir prêter attention au temps (Block et al., 2018; Zakay & Block, 2004a).

Des travaux initiaux ont proposé que les jugements de durée prospectifs et rétrospectifs impliquent des mécanismes similaires (Brown & Stubbs, 1992). Toutefois, des travaux plus récents suggèrent des mécanismes distincts avec un rôle prédominant des mécanismes attentionnels pour le timing prospectif et des mécanismes mnésiques pour le timing rétrospectif (Block et al., 2018; Ünver, 2023; Zakay & Block, 2004). Dans le cadre de ce projet doctoral, nous nous intéressons spécifiquement au timing prospectif, ses mécanismes et modèles, et nous n'aborderons plus le timing rétrospectif.

Parmi ces tâches de timing prospectif, on distingue le timing explicite et implicite, ainsi que le timing moteur et perceptif. Selon Coull & Nobre (2008), la distinction entre le timing

explicite et implicite réside dans la nature de l'objectif de la tâche (i.e., les instructions de la tâche), qui exigent ou non des individus qu'ils fournissent une estimation explicite de la durée (voir Figure 2).

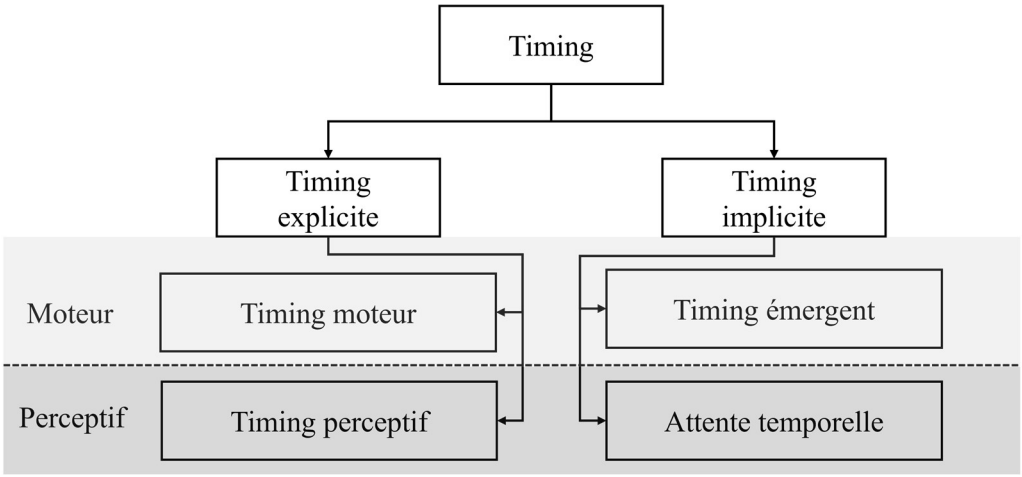


Figure 2 : Une taxonomie fonctionnelle du timing proposée par Coull et Nobre (2008)

Le timing explicite est utilisé pour les tâches nécessitant soit une production motrice (timing moteur), soit une discrimination perceptive (timing perceptif) d'une durée. Le timing implicite est utilisé comme un sous-produit d'une tâche motrice (timing émergent) ou perceptive (attente temporelle). Figure inspirée de Coull et Nobre (2008).

Dans le cas du timing explicite, l'objectif de la tâche exige des participants qu'ils fournissent une estimation de la durée (e.g., estimer la durée d'un feu rouge). Au sein de ces tâches, on distingue également la nature motrice ou perceptive. Le timing explicite moteur peut être considéré comme tout processus temporel dans lequel l'estimation temporelle explicite est intrinsèquement liée au mouvement (e.g., reproduire une durée). Le timing explicite perceptif correspond à une estimation temporelle totalement indépendante du mouvement et uniquement perceptive (e.g., lorsqu'un individu doit discriminer deux durées).

À l'inverse, le timing implicite intervient dans des tâches où la durée n'est pas l'objet principal de la demande, mais joue un rôle essentiel. Par exemple, dans une tâche de détection de collision, les participants estiment le lieu de collision entre deux objets en utilisant

implicitement les informations inhérentes à la vitesse des objets en mouvement. On distingue ici également la nature perceptive et motrice de la tâche. Pour les tâches implicites qui dépendent d'une régularité temporelle liée à une production motrice, le timing implicite moteur est qualifié d'émergent et considéré comme un sous-produit de la dynamique du contrôle moteur (Ivry et al., 2002). Pour les tâches implicites qualifiées par la prévisibilité temporelle des entrées perceptives, le timing est utilisé pour construire une attente concernant l'apparition du stimulus qui doit être traité activement (e.g., identification d'une cible prévisible temporellement ; Correa et al., 2005).

Des études suggèrent une distinction entre les réseaux neuronaux impliqués dans le timing explicite et implicite, bien qu'un débat persiste quant à l'existence de mécanismes distincts ou communs sous-tendant ces deux formes (Coull & Nobre, 2008; Herbst et al., 2022; Wiener et al., 2010b). Le timing explicite impliquerait principalement les ganglions de la base (GB) et le cervelet, en interaction avec le cortex frontal, notamment l'AMS et le cortex frontal inférieur, dont l'engagement varie selon la nature motrice ou perceptive de la tâche (Cope et al., 2014; Coull et al., 2011; Hausdorff et al., 1998; Ivry et al., 1988; O'Boyle et al., 1996; Schwartze et al., 2015; Spencer et al., 2003; Wiener et al., 2010b). À l'inverse, le timing implicite, où la dimension temporelle n'est pas explicitement sollicitée mais émerge de l'organisation motrice ou perceptive, engage davantage les régions pariétales gauches et prémotrices, notamment le gyrus supramarginal inférieur (Wiener et al., 2010b). Cette dissociation est également appuyée par la distinction entre timing moteur explicite (event timing) et implicite (emergent timing) : les mouvements discrets (i.e., event timing) sollicitent des représentations temporelles internes explicites dépendantes des GB et du cervelet, alors que les mouvements continus reposent sur du timing émergent médiés par les réseaux pariéto-prémoteurs (Ivry et al., 2002; Ivry & Spencer, 2004; Spencer et al., 2003; Zelaznik et al., 2002). Dans le cadre de ce projet doctoral, nous nous intéressons spécifiquement au timing explicite.

1.1.1. Les propriétés psychophysiques de l'estimation temporelle

Les premières investigations de la perception du temps remontent au XIXe siècle. Par exemple, James (1890) a été le premier à suggérer que le temps rétrospectif diffère de l'expérience du passage du temps (i.e., timing rétrospectif et prospectif). Par ailleurs, Vierordt (1868) a documenté dans son livre « *Der zeitsinn nach versuchen* » un effet de tendance centrale. Cet effet, qualifié également dans la littérature par « Loi de Vierordt » consiste, par exemple, lorsque trois durées distinctes sont présentées, que la durée la plus courte aura tendance à être surestimée et la durée longue à être sous-estimée, se rapprochant ainsi de la moyenne. À la suite de ces premières recherches, de nouveaux travaux sur la perception du temps ont vu le jour. Une conférence tenue à New York en 1983 (Gibbon & Allan, 1984) a marqué un tournant majeur en rassemblant des chercheurs de divers domaines. Tous s'accordaient sur l'existence d'une horloge interne et sur des propriétés communes : les « propriétés scalaires » chez les non-humains et la « loi de Weber » chez l'humain (Grondin, 2014).

Deux propriétés fondamentales auxquelles on peut s'attendre pour un mécanisme d'estimation temporelle ont étés proposées par Grondin (2014). La première correspond à une estimation en moyenne précise des durées à juger, autrement dit, que la moyenne des intervalles estimés doit être proche de la durée réelle au cours d'une série de tentatives. La seconde correspond à une augmentation scalaire de la variabilité en fonction de l'objectif temporel : plus le temps est long, plus la variabilité de l'estimation temporelle augmente. Ces deux qualités peuvent être formulées par deux fonctions décrites dans le domaine de la psychophysique. La première concerne la forme de la relation entre la grandeur psychologique et la valeur physique pour un continuum sensoriel donné, qui peut prendre différentes formes (e.g., linéaire, géométrique, logarithmique). Elle peut être capturée par la loi des puissances (Stevens, 1975). La seconde fonction concerne la variabilité de l'expérience sensorielle en fonction de

l'amplitude des stimuli physiques, tels que décrit par la loi de Weber, qui suggère que la variabilité augmente de façon linéaire avec l'amplitude du stimulus (Rammsayer & Grondin, 2000).

L'ensemble de ces observations, notamment la propriété scalaire qui est un élément clé de la TTS, a mené à la modélisation des mécanismes de l'estimation temporelle qui ont évolué au cours des dernières décennies et que nous aborderons dans la section suivante.

1.1.2. Théories de l'horloge interne

1.1.2.1. Modèle de l'horloge interne

La plupart des modèles de perception du temps postule que l'estimation temporelle repose sur une triade de fonctions composée d'une horloge, d'un processus mémoriel et d'une prise de décision. Les premiers modèles du traitement de l'information temporelle ont été proposés par Creelman (1962) et Treisman (1963). Le modèle de Treismann s'appuie sur des propositions faites par Hoagland (1933) et Helson (1959) et décrit un modèle cohérent au vue des résultats de leurs travaux (voir Figure 3). Dans ce modèle, un oscillateur génère une série d'impulsions qui circulent le long d'un circuit. Un compteur enregistre le nombre d'impulsions arrivant à un point donné et transfère cette mesure vers une mémoire. Les mesures stockées peuvent être récupérées par un comparateur, qui compare les mesures extraites avec les comptages actuels effectués par le compteur, et sélectionne les réponses à exécuter via les mécanismes de réponse. Un mécanisme de sélection verbale opérant sur la mémoire facilite la récupération, tandis qu'un centre spécifique d'éveil (arousal) agit sur l'oscillateur et peut en modifier la fréquence de celui-ci. Treisman ajoute à ce modèle plusieurs postulats concernant le fonctionnement de chaque module, comme la durée des intervalles entre les impulsions de l'oscillateur (i.e., pacemaker, émetteur), l'influence de l'éveil sur l'oscillateur ou encore la manière dont le compteur (i.e., accumulateur) peut enregistrer les impulsions. On note

qu’aucune proposition quant à l’identité neurophysiologique précise des composantes du modèle n’est posée.

Bien que les premières recherches sur la mesure des intervalles se soient principalement concentrées sur le rôle du système pacemaker/accumulateur, il a rapidement été reconnu que toutes les étapes du traitement de l'information, comme par exemple, l'horloge interne, la mémoire et la prise de décision, pouvaient expliquer les performances de perception du temps (Allan & Kristofferson, 1974). Ainsi, d’autres modèles théoriques se sont développés et l’une des théories les plus élaborées répondant à cette description générale et spécifiant comment les différents composants du traitement de l’information influencent les performances observées est la théorie du temps scalaire (Church, 2003; Gibbon et al., 1984).

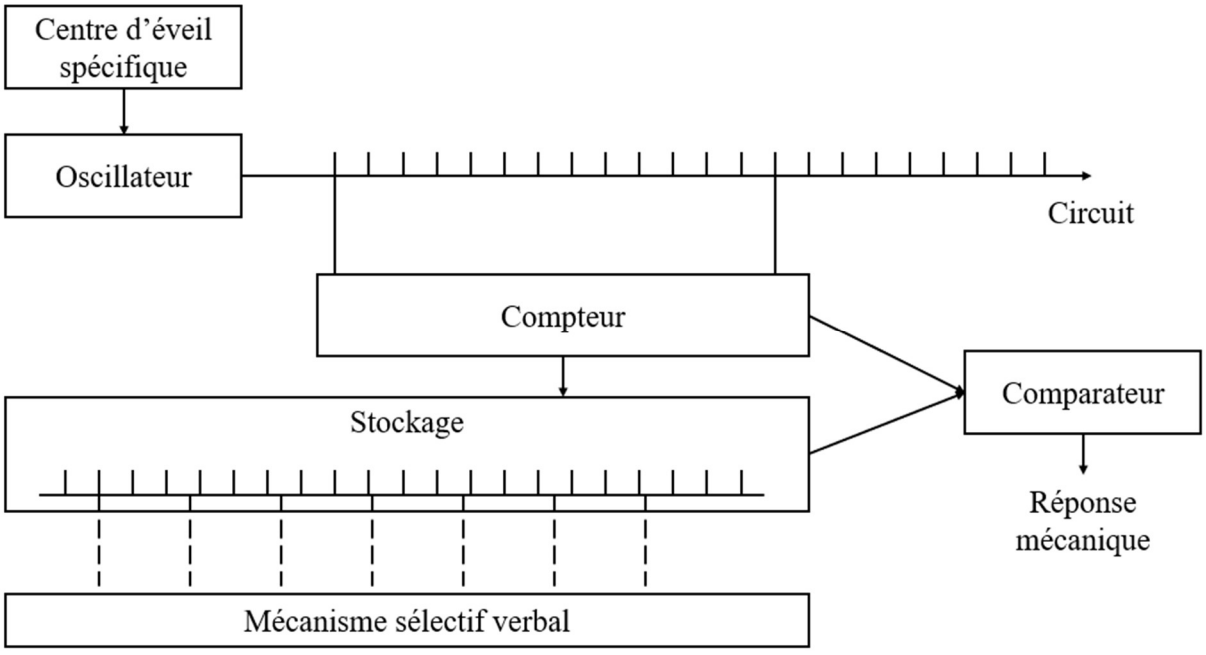


Figure 3 : Modèle d'horloge interne proposé par Treisman (1963) (figure adaptée de Treisman, 1963).

1.1.2.2. Théorie du temps scalaire

Gibbon et al. (1984) proposent la théorie du temps scalaire (TTS ; voir Figure 4) avec le postulat que l'horloge fournit une représentation linéaire et fidèle du temps objectif (propriété scalaire ou loi de Weber), initialement pour expliquer les comportements d'animaux dans des tâches de conditionnement et d'apprentissage, mais elle a été étendue pour la perception du temps chez l'humain (Church, 2003; van Rijn et al., 2014). Ce modèle comporte également trois processus principaux : une horloge, la mémoire et la décision.

Selon l'introduction à la TTS par Church (2003), l'horloge est modélisée à partir de trois composantes : un oscillateur, un interrupteur, et un accumulateur. L'oscillateur génère des impulsions à un rythme régulier, selon une distribution a priori normale. Lorsqu'un événement temporel est détecté, un signal de départ est généré, fermant ainsi l'interrupteur et permettant aux impulsions d'être transmises à l'accumulateur. Chaque impulsion augmente la valeur stockée par l'accumulateur d'une unité, produisant ainsi par ce couple oscillateur/accumulateur une durée subjective. À la fin du stimulus, l'interrupteur s'ouvre et le nombre d'impulsions présent dans l'accumulateur est ainsi stocké en mémoire de travail. La mémoire à long terme contient un ensemble de référence non organisé d'échantillons, chacun associé aux événements environnementaux correspondants. Lorsqu'un organisme souhaite répondre directement à un évènement en cours, il récupère ainsi de la mémoire à long terme un échantillon mnésique associé à une expérience antérieure. Dans la phase de décision, le processus décisionnel repose sur trois entrées : la durée perçue (mémoire à court terme), la durée mémorisée (mémoire à long terme), et un seuil décisionnel.

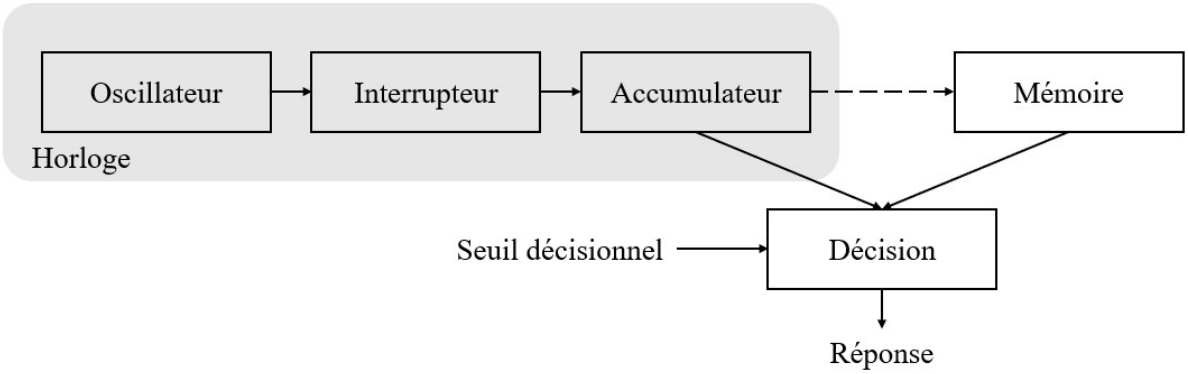


Figure 4 : Une métaphore du traitement de l'information de la théorie du temps scalaire (figure adaptée de Church, 2003)

La TTS est l'une des théories les plus influentes en perception temporelle de ces dernières décennies. Cependant, dans une revue récente des éléments remettent en cause cette théorie, notamment en raison de violations observées de la propriété scalaire pour des intervalles de temps compris entre 1 et 1,9 seconde (Grondin, 2014). De plus, cette non-conformité semble être robuste et ne peut être attribuée à des différences méthodologiques puisqu'elle se manifeste dans des conditions expérimentales variées (e.g., timing moteur et perceptif ; stimuli auditif ou visuel). Cette non-conformité de la propriété scalaire complique également la défense de l'hypothèse d'une horloge centrale unique pour les différentes tâches de timing (e.g., moteur et perceptif) et pour différentes gammes de durées. Cela a mené au développement de l'hypothèse selon laquelle on envisage non plus une horloge centrale et unique, mais une multiplicité d'horloges adaptées au contexte (Merchant et al., 2008a). Toutefois, il est proposé que le modèle scalaire reste d'actualité, car celui-ci permet à ce jour de rendre compte de nombreux résultats expérimentaux, aussi bien chez l'humain que chez les animaux (e.g., Gardner et al., 2023; Matthews & Meck, 2016; Ulrich et al., 2022; Wearden, 2016; Wearden & Ogden, 2021).

1.1.2.3. Théorie de la porte attentionnelle

Dans le prolongement des recherches sur la propriété scalaire et face aux limitations observées dans l'explication des performances temporelles humaines (Block, 1990), notamment l'incapacité de la version initiale du modèle de Treisman (1963) à rendre compte des effets de la charge cognitive et de l'allocation attentionnelle sur l'estimation du temps, Zakay et Block (1995) ont proposé une approche alternative : le modèle de la porte attentionnelle (*attentional-gate model* en anglais ; voir Figure 5). Il se construit sur le modèle proposé par Treisman (1963) ainsi que sur la TTS initiale, et se distingue par l'intégration d'un module cognitif sous la forme d'une porte attentionnelle. Ce module est un mécanisme cognitif régulé par l'allocation de l'attention au temps : plus l'attention est dirigée vers le temps, plus la porte s'ouvre largement, permettant à un plus grand nombre d'impulsions émises par le pacemaker de passer vers le compteur. Ainsi, lorsque le temps joue un rôle important dans une tâche, la porte laisse passer davantage d'impulsions. Ceci est donc valable pour des paradigmes de timing prospectif, où l'attention sur la composante temporelle joue un rôle central. En revanche, dans des conditions rétrospectives, ou lorsque les ressources attentionnelles sont majoritairement mobilisées par une tâche non temporelle, la porte reste fermée, empêchant la transmission d'impulsions.

Ce modèle comprend un oscillateur émettant des impulsions à un rythme constant et un accumulateur qui enregistre les impulsions ayant franchi la porte et l'interrupteur. La porte est un mécanisme cognitif contrôlé par l'allocation de l'attention au temps. L'interrupteur, qui fonctionne selon un mode tout ou rien, est nécessaire pour ouvrir ou fermer l'accès à l'accumulateur. Cet interrupteur s'enclenche en fonction d'événements ou de stimuli ayant une signification temporelle. Lorsqu'un stimulus marque le début d'un intervalle, l'interrupteur s'ouvre. À la fin de l'intervalle, le stimulus provoque la fermeture de l'interrupteur, empêchant l'entrée d'impulsions supplémentaires, et le total est alors transféré en mémoire à court terme.

Zakay et Block (1995) suggèrent que les humains présentent une plus grande flexibilité dans le traitement temporel que les animaux. Ainsi, ils proposent que l'utilisation de la mémoire de référence dépende de la tâche et du contexte. Par exemple, dans une tâche de reproduction temporelle, le participant observe d'abord un intervalle de temps qu'il doit mémoriser. Cet intervalle est encodé et stocké en mémoire de référence. Lors de la phase de reproduction, il appuie de manière continue sur un bouton jusqu'à estimer que la même durée s'est écoulée. Pendant la pression, l'interrupteur se ferme et les impulsions émises par le pacemaker s'accumulent. Le nombre d'impulsions ainsi comptabilisées est alors comparé à celui mémorisé lors de la phase d'encodage, permettant d'évaluer la correspondance entre le temps perçu et le temps mémorisé.

Les modèles récents de la TTS intègrent désormais la notion de porte attentionnelle, qui n'était initialement pas présente. Dans la suite du manuscrit, nous ne distinguerons donc plus le modèle initial de la TTS de la porte attentionnelle. Nous ferons référence au modèle TTS récent qui intègre la porte attentionnelle.

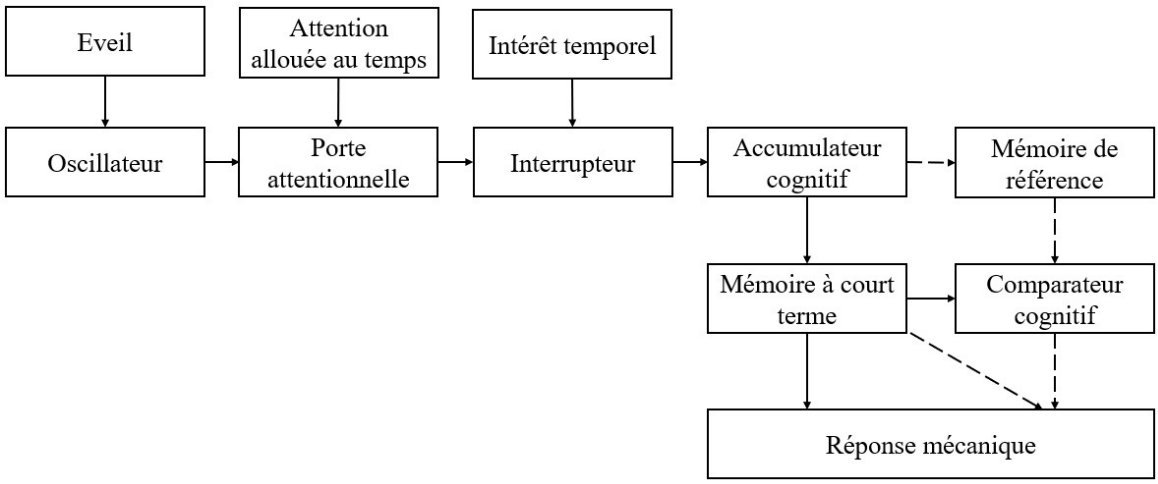


Figure 5 : Modèle de la porte attentionnelle (figure adaptée de Zakay & Block, 1995)

1.1.3. Neurophysiologie de l'estimation temporelle

Les théories décrites précédemment n'émettent pas d'affirmation quant à l'origine neurobiologique ou sur une localisation neuronale des composantes de l'horloge. Cela pourrait être en partie dû au fait que l'étude de la base neurobiologique du timing est relativement récente (début dans les années 1980) par rapport à la psychophysique de l'estimation temporelle qui remonte au XIXe siècle. Toutefois, durant les quarante dernières années, des avancées majeures en neuroscience sur le timing ont été faites. Dans cette section, nous aborderons dans un premier temps l'un des arguments majeurs soutenant les mécanismes d'horloge interne. Dans un second temps, nous aborderons les modèles neurocomputationnelles alternatifs qui ont émergés des nouvelles avancées en neuroscience.

1.1.3.1. Horloge interne et corrélat neurophysiologique

Le principal postulat de la théorie du temps scalaire décrit précédemment, est qu'une horloge dédiée ou qu'un circuit neuronal spécifique fournit accès à un index du temps subjectif, mais la théorie ne comporte pas d'affirmations spécifiques sur une localisation neuronale de cette horloge. En 1999, Macar et ses collaborateurs ont étudié la variation négative contingente (CNV), dont l'origine serait localisée au niveau de l'AMS, et ont proposé que ce corrélat neurophysiologique reflète l'activité de l'accumulateur de l'horloge interne. Selon leurs hypothèses, les variations du jugement subjectif du temps d'un essai à l'autre résultent de différences dans l'état momentané de l'accumulateur, ce qui devrait conduire à une corrélation entre ces variations comportementales et l'amplitude de la CNV. Pour tester cette hypothèse, les participants ont reproduit plusieurs fois une durée standard préalablement apprise de 2,5 secondes en appuyant deux fois sur une touche. Les essais ont ensuite été classés a posteriori en trois catégories : productions « courtes » (2,2-2,4 s), productions « correctes » (2,4-2,6 s) et productions « longues » (2,6-2,8 s). La CNV mesurée à l'électrode FCz, censée refléter l'activité de l'AMS, a été comparée entre ces trois conditions. Conformément à l'hypothèse selon laquelle

l'activité neuronale croissante est reflétée par la CNV, les auteurs ont observé une amplitude de CNV plus élevée dans la condition longue, une amplitude intermédiaire dans la condition correcte et une amplitude plus faible dans la condition courte. Cette corrélation positive entre la durée produite et l'amplitude de la CNV a été interprétée comme un argument en faveur d'un lien direct entre le déroulement du temps subjectif et l'amplitude de la CNV. D'autres travaux supportent l'idée d'accumulation au sein de l'AMS (Coull et al., 2004, 2015). Cependant, d'autres travaux remettent en question cette interprétation, notamment du fait de la difficulté à reproduire cet effet de magnitude de la CNV (Kononowicz et al., 2017; Kononowicz & Penney, 2016; Kononowicz & van Rijn, 2011). De plus, on observe dans l'insula une activité de type accumulateur, qui encode la durée dans une plage de plusieurs secondes (Wittmann et al., 2010). En conséquence, l'interprétation des résultats d'origine de la CNV et sa spécificité en lien avec l'accumulateur est en débat (Ng & Penney, 2014).

1.1.3.2. Modèles neurocomputationnels

Les études récentes suggèrent que la perception du temps est un processus complexe, dépendant de l'interaction entre plusieurs structures neuronales jouant un rôle dans la perception du temps (Harrington et al., 2010; Merchant, Pérez, et al., 2013; Teghil & Wittmann, 2025). Ainsi plusieurs structures ont été identifiées, comme le cortex frontal, le cortex pariétal, les ganglions de la base et le cervelet (voir Figure 6). Toutefois, face à la difficulté à identifier une région spécifique et amodale et/ou des corrélats neurophysiologiques correspondant aux composantes de l'horloge interne, en plus de la non-conformité de la propriété scalaire, il a été suggéré qu'une réévaluation des modèles traditionnels d'horloge interne centrale est nécessaire. A partir des données récentes en neurosciences, plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature, parmi lesquels on retrouve le modèle Striatal-Beat-Frequency (SBF ; Matell & Meck, 2004) et le modèle sur l'état des réseaux neuronaux (en anglais *state-space trajectories* ;

Buonomano, 2014). Ce premier fera l'objet d'une description détaillée, en raison de sa similarité avec les modèles d'horloge interne, malgré des différences fonctionnelles notables.

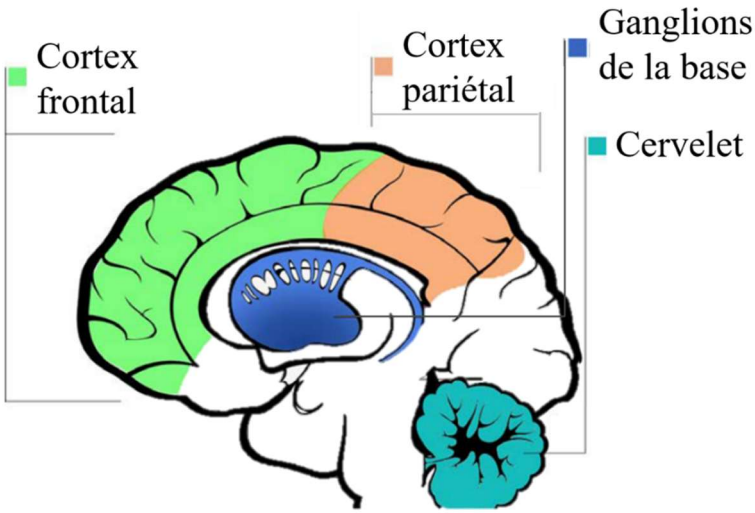


Figure 6 : Structures neuronales impliquées dans la perception temporelle

Figure extraite et adaptée de Fontes et al. (2016), représentant certaines des régions du cerveau impliquées dans la perception du temps : cortex frontal, pariétal, les ganglions de la base, et le cervelet.

1.1.3.2.1. Modèle Striatal-Beat Frequency

Dans le modèle Striatal-Beat Frequency (SBF) décrit par Matell & Meck (2004), l'estimation temporelle se fait par l'exploitation des oscillations neuronales synchronisées de diverses bandes de fréquence (thêta, alpha, bêta) pour encoder le temps. Il repose sur l'idée que des groupes de neurones corticaux fonctionnent comme des oscillateurs faiblement couplés, chacun oscillant à une fréquence stable mais légèrement différente. Selon les auteurs, ces oscillateurs corticaux projettent de manière convergente vers les neurones du striatum, en particulier les neurones du striatum à épines de taille moyenne (*medium spiny neurons* (MSN) en anglais), qui agissent comme des détecteurs de coïncidence. Lorsqu'un stimulus déclencheur (e.g., un signal auditif marquant le début d'un intervalle) est perçu, il synchronise les phases

des oscillateurs corticaux. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, les oscillateurs se désynchronisent progressivement à cause de leurs fréquences distinctes. Au cours de l'intervalle, lorsqu'une configuration particulière de phase relative entre les oscillateurs est atteinte, correspondant à l'intervalle appris, les MSN détectent cette configuration particulière et déclenchent une réponse indiquant que la durée cible a été atteinte. Ce processus repose sur l'apprentissage : les MSN deviennent sensibles à un motif temporel donné grâce à une plasticité synaptique dopaminergique dépendante de la récompense ou de la rétroaction correcte. Ainsi, après un entraînement répété avec renforcement, le système associe une configuration de phase bien définie à une durée spécifique.

Le modèle SBF est relativement similaire, bien que distinct, aux modèles d'horloge interne, comme le décrit van Rijn et al. (2014). Premièrement, les oscillateurs du modèle SBF fournissent une information temporelle comparable à celle générée par la paire pacemaker/accumulateur dans le modèle scalaire du temps. Deuxièmement, les connexions striato-corticales dans le modèle SBF remplissent une fonction analogue à celle de la trace mnésique dans les modèles d'horloge interne, en s'appuyant sur les MSN, sensibles à des durées spécifiques. Dernièrement, l'activité des MSN peut être assimilée à la phase décisionnelle dans le modèle scalaire, au cours de laquelle une durée est comparée à une représentation mnésique de référence. Toutefois, une différence majeure entre le modèle SBF et d'horloge interne existe. Les modèles d'horloge interne stipulent généralement une règle décisionnelle (e.g., la règle du ratio dans le modèle scalaire du temps) permettant d'estimer différentes durées, à condition que ces durées puissent être encodées de manière unique dans la mémoire et extraites de celle-ci. En revanche, dans le modèle SBF, la force synaptique spécifique à chaque MSN permet l'encodage d'une durée unique par neurone. Ainsi, pour une durée donnée, le MSN associé à cette durée sera toujours actif une fois que la durée est atteinte. De plus, si un événement futur

avec une structure temporelle identique apparaît, ce MSN spécifique pourrait être rattaché à cet événement.

1.1.3.2.2. Etat des réseaux neuronaux

Le modèle sur l'état des réseaux neuronaux, initialement introduit par Buonomano (2000), postule qu'un système neuronal peut exploiter la variation naturelle des propriétés neuronales et synaptiques et l'évolution temporelle des états neuronaux, sans avoir besoin de mécanismes explicitement et spécifiquement ajustés pour estimer le temps. Une fois activé, un système neuronal suivrait une trajectoire unique à travers son espace d'états (e.g., l'espace couvert par les potentiels membranaires ou les activités de décharge de tous les neurones d'un réseau local). Dans ce modèle, la perception du temps s'appuierait sur des processus comparables à l'observation de l'évolution d'un système physique, tel que la propagation d'ondes à la surface d'un lac, pour en déduire l'écoulement temporel. Les auteurs proposent également que le jugement temporel ne soit pas centralisé et puisse potentiellement se produire localement à la fois aux stades précoces et tardifs du traitement cortical. Sur le plan psychophysique, Karmarkar & Buonomano (2007) ont démontré que les prédictions de ce modèle concordent avec les performances humaines dans la plage des centaines de millisecondes. Dans leur revue, Goel & Buonomano (2014) mettent en évidence un ensemble de travaux *in vivo* réalisés dans diverses régions du système nerveux d'invertébrés, de grenouilles, de poissons, d'oiseaux et de mammifères. Ces études convergent vers l'idée que la mesure du temps, à des échelles comprises entre quelques dizaines de millisecondes et quelques secondes, constitue une propriété intrinsèque des circuits neuronaux, et non le résultat d'un traitement spécialisé localisé dans une aire cérébrale particulière (Ivry & Schlerf, 2008). Ils suggèrent également que les observations de réponses temporellement organisées dans des circuits *in vitro*, ainsi que les données montrant leur capacité d'adaptation à la structure temporelle des stimulations reçues, fournissent des arguments en faveur de l'hypothèse du

timing intrinsèque. En somme, ils proposent que, bien que les mécanismes précis à l'origine des différentes formes de traitement temporel restent à déterminer, les données suggèrent que certaines formes de mesure du temps à l'échelle infra-seconde reposent sur des dynamiques internes propres aux circuits neuronaux, représentant une propriété générale plutôt qu'un processus dépendant de structures spécialisées ou centralisées.

1.1.4. Le cadre bayésien

Le cadre bayésien, comme décrit par Petzschner et al. (2015), a été initialement proposé pour modéliser l'estimation des magnitudes (durée, distance, taille, intensité), et s'appuie sur la convergence de résultats montrant des régularités à travers différentes modalités (e.g., proprioception, la vision et l'audition) (DeCarlo & Cross, 1990; Dehaene & Brannon, 2010; Stevens & Galanter, 1957): biais de tendance centrale, amplification de ce biais avec l'étendue des échantillons, variabilité scalaire de l'erreur, et dépendances séquentielles entre jugements successifs. Ces effets ont souvent été expliqués par des modèles spécifiques à la modalité (e.g., Lappe et al., 2007), hormis pour la variabilité scalaire qui est amodale et cohérente avec une représentation logarithmique de type Weber-Fechner (Dehaene, 2003). Petzschner et al. (2015) ont plaidé pour un principe unificateur, indépendant de la modalité pour l'ensemble de ces effets, et des travaux récents indiquent que l'intégration de l'expérience antérieure dans l'estimation des magnitudes fournit une explication parcimonieuse. Dans un observateur bayésien muni d'un modèle génératif, l'état latent est inféré en combinant un a priori et une vraisemblance sensorielle bruitée, chaque source étant pondérée par sa précision relative ; cette combinaison optimale induit un biais dès que l'a priori s'écarte de la valeur physique, biais qui croît avec la précision de l'a priori et décroît avec le rapport signal/bruit des entrées sensorielles. Ce cadre rend compte d'un large éventail de phénomènes perceptifs (e.g., Ernst & Banks, 2002; Ernst & Bülthoff, 2004) et d'estimation de grandeurs (e.g., Jazayeri & Shadlen, 2010; Jürgens & Becker, 2006).

De Kock et al., (2021) décrive le modèle de la combinaison bayésienne d'indices (CBI ; *Bayesian Cue Combination* en anglais) dans le cadre de la perception du temps, qui reposerait sur un mécanisme par lequel le cerveau combine des estimations sensorielles bruitées issues de différentes modalités. La CBI constitue une extension de la théorie bayésienne de la décision, dans laquelle les estimations sensorielles bruitées sont interprétées comme des échantillons tirés d'une fonction de vraisemblance caractérisée par une moyenne (μ) et une variance (σ^2), qui sont ensuite combinées avec une distribution a priori fondée sur des estimations antérieures afin de former une estimation a posteriori du stimulus. Dans le cas où deux modalités sensorielles sont présentées, les estimations sont combinées de manière optimale selon le principe de l'estimation par maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood Estimation* en anglais). Dans ce cadre, la variance de la distribution de l'estimation multisensorielle correspond au produit des variances unisensorielles divisé par leur somme. Par ailleurs, la moyenne de l'estimation multisensorielle résulte d'une somme pondérée des moyennes unisensorielles, les pondérations étant inversement proportionnelles aux variances unisensorielles. Ainsi, la moyenne de l'estimation multisensorielle est toujours (i) plus proche de l'estimation unisensorielle de la modalité la plus précise, et (ii) elle-même plus précise que chacune des estimations unisensorielles prises isolément. Ainsi, dans le cas de la perception du temps, la CBI a permis d'expliquer et de prédire l'intégration temporelle d'indices auditifs et visuels (Hartcher-O'Brien et al., 2014), visuels et tactiles (Ball et al., 2017), mais également les effets du mouvement sur la performance temporelle (De Kock et al., 2023).

1.2. Relation entre perception du temps et mouvement

Dans notre vie quotidienne, l'estimation du temps se manifeste souvent à travers des actions motrices. Lorsqu'un piéton souhaite traverser la rue, il évalue le temps disponible avant l'arrivée d'un véhicule pour décider du moment d'initiation de la marche ou de sa vitesse de marche. Le musicien doit par exemple synchroniser ses gestes avec un tempo donné. Le joueur

de tennis doit anticiper la trajectoire et la vitesse de la balle pour se déplacer et frapper au moment optimal. En gymnastique rythmique, les gymnastes doivent synchroniser leurs mouvements sur un métronome et entre eux. Ce lien entre timing et mouvement apparaît d'autant plus de manière évidente dans le domaine clinique, comme la rééducation de la marche des patients atteints de la MP, où des signaux auditifs rythmiques (e.g., métronome) améliorent la qualité de la marche (Bella et al., 2017; Benoit et al., 2014). Le temps semble donc être inexorablement lié au mouvement, car pour qu'un mouvement ait lieu, la précision temporelle est nécessaire d'une part pour assurer la coordination entre les membres, interagir avec l'environnement et donc par exemple nous permettre d'atteindre une cible au juste moment (Todorov, 2004). Cette interaction se démontre également par des études qui indiquent que les individus experts du mouvement (i.e., athlète de haut niveau, musicien, danseur) ont des performances temporelles supérieures comparativement aux non-experts (Y.-H. Chen & Cesari, 2015; Cicchini et al., 2012; Sgouramani & Vatakis, 2014). De plus, il a été proposé que notre perception du temps pourrait se construire et s'acquérir au cours du développement au travers de nos actions motrices (Droit-Volet & Rattat, 1999; Pouthas, 1985). Ce lien est également supporté par des études en neuroimagerie, montrant des régions cérébrales communes au mouvement et à la perception du temps (Chen et al., 2008; Coull et al., 2011, 2016; Gordon et al., 2018; Grahn & Brett, 2007; Ross et al., 2018; Wiener et al., 2010a).

Nous aborderons dans un premier temps un ensemble d'évidences suggérant une interaction entre les capacités de perception du temps et le contrôle moteur, que ce soit sur le plan neurophysiologique ou comportemental. Nous présenterons ensuite les propositions de modélisation de cette interaction. Enfin, nous discuterons de l'influence de différents effecteurs sur cette interaction.

1.2.1. Evidences neurophysiologiques de l'interaction perception du temps et mouvement

Les études rapportent que la perception du temps et le contrôle moteur partagent des structures neuronales communes. Cette observation est attendue puisque chaque mouvement que nous effectuons implique une dimension temporelle. En effet, le contrôle moteur implique intrinsèquement une coordination spatiale et temporelle du mouvement. Le contrôle moteur, défini comme la régulation par le système nerveux des activités motrices en vue de produire un comportement orienté et coordonné, sollicite plusieurs structures parmi lesquelles on retrouve le cervelet, les GB et l'AMS, qui sont également impliquées dans la perception du temps.

Le cervelet, souvent décrit comme une horloge régulant le mouvement, coordonne l'enchaînement et la durée des différentes composantes d'un geste (Brooks & Thach, 2011). Considéré comme un élément central du système moteur, il génère des prédictions relatives aux mouvements à venir tout en traitant le retour sensoriel lié aux erreurs motrices (Popa & Ebner, 2019). Toutefois, son implication ne se limite pas au contrôle moteur. Les études en neuroimagerie révèlent en effet un rôle essentiel du cervelet dans diverses fonctions cognitives et comportementales, telles que les fonctions exécutives ou la cognition spatiale (Salman, 2002). Ainsi, son implication conjointe dans l'estimation temporelle et le contrôle moteur s'inscrit dans un cadre plus large de traitement prédictif sensorimoteur et cognitif (Popa & Ebner, 2019). Selon Salman (2002), le cervelet possède des mécanismes spécifiques dédiés au traitement temporel, caractérisés non pas par une horloge unique de type pacemaker ou oscillatoire, mais par une multitude d'horloges pouvant traiter différents intervalles temporels. Cette diversité fonctionnelle permet au cervelet d'assurer une régulation temporelle fine dans des contextes variés. En parallèle, dans leur revue, Popa & Ebner (2019) soulignent que le cervelet fonctionne selon un modèle prédictif interne (*forward internal model* en anglais),

anticipant les conséquences sensorielles des commandes motrices et calculant les erreurs prédictives par comparaison entre les prédictions effectuées et les retours sensoriels reçus.

Les GB sont un ensemble de noyaux interconnectés comprenant : le striatum, composé du noyau caudé et du putamen et le globus pallidus. Les GB sont majoritairement connus pour leurs rôles dans le contrôle moteur, notamment suite aux études portant sur la MP (Kotz et al., 2016), qui est associée à un manque de dopamine et des troubles moteurs comme les tremblements et de « Freezing of Gait ». Les études sur la MP suggèrent que les GB jouent un rôle majeur dans la régulation temporelle de mouvement répété, comme la marche (Hausdorff et al., 1998; O'Boyle et al., 1996), et aussi de mouvement guidé par des stimuli externes (Khudados et al., 1999). Il a également été démontré que les personnes atteintes de la MP ont une altération des performances dans une tâche de discrimination temporelle (i.e., en l'absence de mouvement), avec une corrélation négative entre le degré de sévérité de la maladie et la performance de discrimination (Artieda et al., 1992). Par ailleurs, Baker et al., (2008) démontrent une amélioration de la régularité de la marche en présence d'un marqueur temporel induit par stimuli auditif régulier (i.e., un métronome). Ces résultats suggèrent que les ganglions de la base jouent aussi un rôle dans la perception du temps, que ce soit pour des tâches de timing perceptif ou moteur. Le circuit striato-thalamo-cortical représente un mécanisme central du jugement temporel, activé lors du traitement temporel cognitif explicite (Merchant, Harrington, et al., 2013; Petter et al., 2016). De nombreuses études confirment l'implication du striatum dans le jugement temporel allant de quelques millisecondes à plusieurs minutes (e.g., Harrington et al., 2010; Jahanshahi et al., 2010; Jones & Jahanshahi, 2014; Koch et al., 2009). Dans la revue de Petter et al. (2016) il est proposé que les régions cérébrales appartenant au réseau cérébelleux-thalamo-striato-cortical jouent des rôles distincts au cours des différentes phases du traitement temporel : initiation, maintien, ajustement et terminaison. Dans ce réseau, le système cérébelleux intervient principalement dans les phases d'initiation et d'ajustement,

tandis que le réseau striato-thalamo-cortical est davantage impliqué dans les phases de maintien ainsi que dans l'initiation des durées déjà apprises. La terminaison du timing résulterait d'une coordination entre ces deux systèmes. Ils proposent que les mécanismes temporels du cervelet alimentent ces circuits striato-thalamo-corticaux, contribuant à la correction d'erreur et à la facilitation du système striatal (Schwartze et al., 2015). À mesure qu'une tâche est apprise, la nécessité d'ajustements moteurs et temporels diminue, de même que la dépendance envers le cervelet. Bien que chaque réseau neuronal présente un certain degré de spécialisation, une estimation temporelle à la fois précise et fiable semble nécessiter une action coordonnée et intégrée de l'ensemble de ces réseaux (Meck, 2005; Muller & Nobre, 2014).

Les régions de l'AMS et de la pré-AMS jouent un rôle central dans le contrôle moteur volontaire. Il est proposé que la pré-AMS soit impliquée dans l'apprentissage de nouvelles séquences motrices (« Voluntary Movement: The Parietal and Premotor Cortex », 2014) et lorsqu'un nouveau plan moteur doit-être élaboré dans des contextes d'initiation ou de changement de tâche (Braver & Barch, 2006; Dosenbach et al., 2006; Tanji, 1996). Selon Coull et al. (2016) la pré-AMS contrôle la sélection et l'inhibition volontaire d'actions définies par un stimulus, tandis que l'AMS intervient dans l'initiation d'actions spontanées, auto-générées. Il est généralement admis que l'AMS est associée à la génération de mouvement volontaire (Laplane et al., 1977; Tanji & Kurata, 1985), mais aussi lorsque le mouvement est généré par un stimulus externe (Tanji, 1994). L'AMS semble également être activé bien avant l'exécution du mouvement, suggérant une forte implication dans la préparation et la programmation du comportement moteur. Face au constat que l'AMS joue un rôle important non seulement dans le contrôle moteur, mais également dans la perception du temps, et que cette aire est également activée lors de tâches de timing perceptif (i.e., sans mouvement), Coull et al. (2016) posent la question de savoir pourquoi une aire impliquée dans le contrôle volontaire du mouvement est aussi impliquée lors de tâches de timing perceptif. Ces auteurs proposent que notre capacité à

percevoir le temps s'acquiert par l'action. Plus précisément, que les aires motrices, telles que l'AMS, sont sollicitées par l'action pour construire une représentation du temps. Leurs hypothèses sont également étayées par plusieurs observations démontrant que le mouvement améliore les performances temporelles chez les enfants (Pouthas, 1985), qu'un entraînement impliquant un mouvement entraîne une amélioration des performances temporelles par rapport à un entraînement sans mouvement (Carlini & French, 2014; Fautrelle et al., 2015), qu'une représentation mentale d'un mouvement suffit pour améliorer les performances temporelles (Fautrelle et al., 2015; Killeen & Fetterman, 1988).

1.2.2. Une relation dynamique entre la perception du temps et le mouvement

Les données en neuroimagerie soutiennent l'hypothèse d'une interaction entre la perception du temps et le mouvement, comme l'indiquent également des études récentes sur des données comportementales (pour revue Balasubramaniam et al. (2021) et De Kock et al. (2021)). Cette relation est qualifiée de dynamique, dans la mesure où l'interaction se manifeste dans les deux sens : le mouvement module la perception du temps (i.e., la variabilité et/ou la précision temporelle) et, réciproquement, la capacité de perception du temps soutient les capacités sensorimotrices.

Différentes études rapportent que les mouvements peuvent influencer la précision temporelle, induisant soit une dilatation (Binetti et al., 2010; Capelli et al., 2007; Fautrelle et al., 2015; Israël et al., 2004; Su & Pöppel, 2012; Wiener et al., 2019) soit une compression du temps perçu (Allingham et al., 2021; Castellotti et al., 2022; Morrone et al., 2005; Tomassini et al., 2014; Yokosaka et al., 2015). Par exemple, Yokosaka et al. (2015) ont étudié l'effet de mouvements rapides de la main sur l'estimation temporelle, montrant que l'exécution de mouvements rapides de la main induit une compression du temps perçu. Dans une autre étude, menée par Allingham et al. (2021), les participants ont réalisé des mouvements de danse à trois

vitesses différentes, puis ont estimé la durée de ces séquences. Leurs résultats indiquent que les séquences les plus rapides sont jugées comme étant plus longues. D'autres paramètres du mouvement ont également été identifiés comme modulant la précision temporelle. De plus, dans une l'étude menée par Anelli et al. (2015), les participants réalisaient une tâche de bissection temporelle, consistant à reproduire la moitié de la durée d'un stimulus présenté soit dans un espace proche (atteignable), soit dans un espace lointain (hors d'atteinte). Les stimuli qui apparaissent dans un espace proche sont perçus comme ayant une durée plus courte que ceux qui se trouvent dans des espaces hors d'atteinte. Après un entraînement actif à l'usage d'un outil permettant d'atteindre l'espace lointain, la différence de durée perçue entre les deux espaces disparaissait. Selon les auteurs ces résultats suggèrent que l'usage actif d'un outil modifie et étend spatialement notre potentiel d'action, entraînant une reconfiguration du codage temporel fondée sur cette potentialité. Cette reconfiguration s'est révélée strictement dépendante de l'action, puisque l'extension du potentiel d'action ne s'est produite qu'après un entraînement actif à l'usage de l'outil, et non après son utilisation immédiate. L'ensemble de ces résultats illustrent la diversité des effets des paramètres du mouvement sur le temps perçu.

De façon intéressante, il a aussi été démontré récemment que la capacité de perception du temps permet de prédire les capacités sensorimotrices (D'Andrea-Penna et al., 2020). Dans cette étude, les participants ont effectué une tâche de synchronisation avec un métronome et avec une tâche distincte d'écoute passive manipulant l'attente temporelle, tout en enregistrant l'activité EEG. De l'activité EEG, les potentiels évoqués N1-P2 en réponse à des rythmes inattendus comparés à des temps prévisibles ont été extraits. La différence entre les deux conditions fut désignée sous le terme d'indice de réponse temporelle (IRT). Ils démontrent que l'IRT est corrélé à la performance dans la tâche de synchronisation. Autrement dit, les individus montrant une meilleure synchronisation présentent une réponse cérébrale plus marquée aux

rythmes inattendus (voir Figure 7). L'IRT pourrait ainsi constituer un marqueur neuronal du traitement temporel général (D'Andrea-Penna et al., 2020).

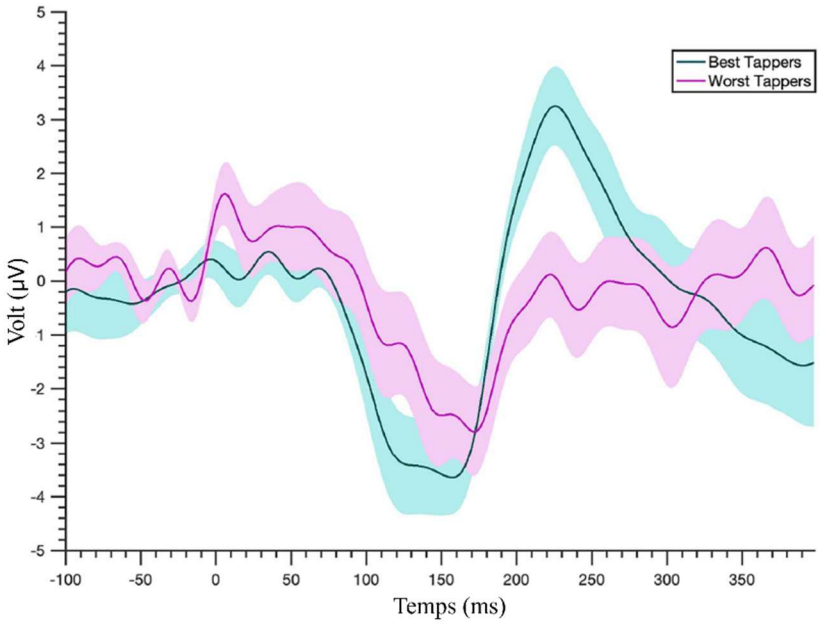


Figure 7 : Les meilleurs synchroniseurs présentent une réponse cérébrale plus marquée aux stimuli déviants.

Onde de différence (différence de l'activité EEG à Cz entre les stimuli déviants et standards) ; zone ombrée = erreur standard) pour les 10 plus performants (en turquoise) et les 10 moins performants (en magenta) pour se synchroniser à un métronome. Les plus performants présentent une amplitude significativement plus ample par rapport aux moins performants. Figure extraite de D'Andrea-Penna et al. (2020).

1.2.2.1. Temps et mouvement selon la théorie du temps scalaire

L'attention joue un rôle majeur pour le jugement temporel (e.g., Zakay & Block, 1995). A ce titre, il est proposé qu'un mouvement concomitant à une tâche de timing implique un partage des ressources attentionnelles entre la tâche temporelle et la tâche non-temporelle (i.e., mouvement). Dans cette perspective, Kroger-Costa et al. (2013) émettent l'hypothèse que le mouvement simultané à une tâche de timing entraîne des effets comparables à ceux observés

dans les paradigmes de double tâche (Brown, 1997; Hemmes et al., 2004; Kladopoulos et al., 2004). Conformément au modèle récent du TTS intégrant la porte attentionnelle précédemment décrit, le partage attentionnel devrait induire une diminution du nombre d'impulsions accumulées par l'accumulateur, menant ainsi à une sous-estimation de la durée physique. Toutefois, Kroger-Costa et ses collaborateurs observent l'inverse. Les participants sur-estiment le temps dans une tâche de bissection, lorsqu'un mouvement concurrent est effectué (i.e., marcher) par rapport à une condition sans mouvement (i.e., se tenir debout). Ces résultats, ainsi que ceux d'autres études employant des tâches impliquant le corps entier (*whole-body movement* en anglais) s'opposent aux prédictions du modèle de la porte attentionnelle (e.g., Binetti et al., 2010; Capelli et al., 2007; Israël et al., 2004). Les auteurs discutent de cette divergence en considérant la nature de la tâche non-temporelle, en lien notamment avec l'étude de Molet et al. (2011). Dans cette dernière, les auteurs ont examiné l'effet de deux types de tâches non-temporelle effectuées en parallèle d'une tâche de bissection temporelle. Ils ont rapporté qu'une tâche non temporelle simultanée consistant à compter à rebours par trois entraînait une sous-estimation temporelle, tandis qu'exercer une force continue sur un transducteur entraînait une surestimation temporelle. Ces auteurs observent des résultats reflétant la prédiction du modèle de porte attentionnelle (i.e., une sous-estimation) lorsque la tâche non-temporelle consistait à compter à rebours par trois, mais une surestimation lorsque la tâche impliquait l'application continue d'une force sur un transducteur. Ils discutent cette différence en suggérant qu'une tâche secondaire exigeante sur le plan cognitif réduit l'attention portée aux indices temporels (i.e., compter à rebours), tandis qu'une tâche impliquant une force renforce l'attention portée aux indices temporels.

Une hypothèse alternative à l'attention, serait que par sa nature, le mouvement peut moduler le fonctionnement du pacemaker, au même titre que l'éveil est proposé comme modulateur de l'oscillateur dans le modèle original de Treismann (1963). Dans cette alternative,

le mouvement pourrait accélérer le pacemaker dans le cadre du TTS, induisant davantage d'impulsions accumulées, entraînant ainsi une surestimation. Par exemple, Sayali et al. (2018) ont testé cette hypothèse en demandant aux participants d'effectuer une tâche de reproduction temporelle selon différentes conditions. Dans la première condition, les participants restaient immobiles sur un tapis roulant pendant l'encodage et le décodage (i.e., la reproduction) (« repos – repos »). Dans la deuxième condition, les participants restaient immobiles pendant l'encodage, puis reproduisaient la durée tout en marchant sur le tapis roulant à une vitesse prédéterminée (« repos – mouvement »). Dans la troisième condition, les participants encodaient la durée cible et la reproduisaient tout en marchant à la même vitesse prédéterminée (« mouvement – mouvement »). Dans la quatrième condition, les participants encodaient la durée cible en marchant et la reproduisaient ensuite en restant immobiles (« mouvement – repos »). Dans la condition « repos – mouvement », ils observent une sous-reproduction, similaire à l'étude de Kroger-Costa et al. (2013). Tandis qu'ils observent pour la condition « mouvement – repos » une sur-reproduction. Ces résultats soutiennent l'hypothèse que le mouvement influence la perception du temps par la modulation de la vitesse de fonctionnement de l'oscillateur et, plus spécifiquement, en accélérant son fonctionnement. Cette modulation serait permise par le fonctionnement dopaminergique. Meck (1996) a démontré que l'administration d'un antagoniste dopaminergique ralentit l'oscillateur, tandis qu'un agoniste dopaminergique l'accélère. En parallèle, il a été reporté que l'activité physique augmente le niveau de dopamine dans le striatum (Bastioli et al., 2022; Marques et al., 2021; Meeusen & Piacentini, 2001). Toutefois, dans l'hypothèse où le mouvement accélère le rythme de l'oscillateur, on devrait s'attendre à une réduction de la variabilité temporelle. Or, ce ne fut observé ni dans l'étude de Sayali et al. (2018), ni dans celle de Kroger-Costa et al. (2013).

1.2.2.2. Temps et mouvement selon la combinaison bayésienne d'indices

D'autres études rapportent que le mouvement influence la variabilité temporelle, notamment en la réduisant. Par exemple, Wiener et al. (2019) se sont intéressé à examiner l'implication du système moteur dans la perception du temps en utilisant une tâche d'atteinte avec le bras (*reaching movement* en anglais) combiné à une tâche de timing perceptif et moteur. Les participants ont été répartis en deux groupes : un groupe libre de mouvement, autorisé à se mouvoir pendant la présentation d'un intervalle de temps, et un groupe restreint ne pouvant pas se mouvoir. Leurs résultats démontrent une réduction de la variabilité temporelle chez les participants pouvant bouger librement. Selon les auteurs, ces effets ne s'expliquent ni par la proximité spatiale des cibles, ni par des stratégies de comptage du temps, ou des différences de longueur de mouvement. En effet, aucune différence du coefficient de variation (CV) n'a été détectée lorsque la proximité était manipulée, excluant l'hypothèse d'un tel effet. De plus, le comptage, explicitement découragé, n'a pas pu intervenir, d'autant que la constance du CV à travers les durées testées confirme le respect de la propriété scalaire, incompatible avec une stratégie de comptage. Enfin, ils n'observent aucune corrélation entre la longueur des trajectoires et les performances temporelles. Ils émettent l'hypothèse que le système moteur permet de simuler activement l'intervalle de temps par le mouvement, exploitant ainsi la résolution temporelle supérieure associée à ce système. Cette étude constitue ainsi un travail précurseur pour une recherche ultérieure menée par la même équipe, que nous présenterons ci-dessous (i.e., De Kock et al., 2023).

Bien que la perception du temps soit plus fidèle pour des stimuli auditifs seuls que pour les modalités visuelles et tactiles (Jones et al., 2009; Wiener et al., 2014), des travaux antérieurs ont montré que la combinaison de plusieurs modalités est plus efficace qu'une modalité isolée (Ball et al., 2017; Manning & Schutz, 2013; Occelli et al., 2011). Cette hypothèse est en lien avec l'étude précédente de Wiener et al. 2019, et a été davantage explorée dans une étude

récente par De Kock et al. (2023). Ils se sont intéressés à étudier les mécanismes à l'origine des effets liés au mouvement sur le timing, en utilisant une tâche de reproduction temporelle. La tâche variait selon la modalité utilisée lors de la phase d'encodage de l'intervalle cible : audition seule, mouvement seul, et une combinaison de mouvement et audition. Leurs résultats démontrent des différences de précision entre les différentes modalités, avec une précision plus élevée pour la combinaison des deux modalités. Les auteurs proposent le modèle de CBI, décrit dans la section précédente, pour expliquer ces résultats. Contrairement aux modèles décrits précédemment (e.g., TTS) qui se concentrent sur des mécanismes d'horloge interne et qui ne tiennent pas explicitement compte du rôle des signaux sensorimoteurs externes dans le jugement temporel (De Kock et al., 2021), la CBI aborde explicitement ces interactions sensori-motrices. Selon ce modèle, de multiples sources d'informations temporelles sont combinées en fonction de leur fiabilité, ce qui permet d'obtenir des estimations plus précises par rapport aux estimations à modalité unique (Alais & Burr, 2019; Ma et al., 2006; Seilheimer et al., 2014). Dans cette perspective, il est proposé que les actions motrices offrent des signaux temporels supplémentaires qui s'intègrent de manière optimale aux signaux sensoriels, expliquant ainsi les effets bénéfiques du mouvement sur la variabilité temporelle, comme décrit précédemment (pour revue De Kock et al., 2021).

Dans la revue par De Kock et al. (2021), deux hypothèses sont avancées et discutées pour expliquer l'implémentation des effets du mouvement sur la perception du temps, en lien avec la CBI : l'hypothèse d'amélioration de la rétroaction (*feedforward enhancement* en anglais) et l'hypothèse de la perception active (*active sensing* en anglais).

Selon l'hypothèse d'amélioration de la rétroaction, les effets du mouvement sur la perception du temps émergent au sein même des régions motrices (Iwasaki et al., 2019). Étant donné que le système moteur est actif même en l'absence de mouvement, lors de tâches d'estimation temporelle (Coull, 2004; Coull et al., 2004), il est plausible que le traitement

temporel soit intrinsèquement modulé par l'activité motrice. Des études antérieures ayant mis en évidence des réponses temporelles dans les cortex moteur et prémoteur ont suggéré que le système moteur serait capable de construire des modèles internes d'événements temporellement prévisibles (Schubotz, 2007), permettant d'ajuster avec précision le timing des mouvements futurs (Coull et al., 2016; McNamee & Wolpert, 2019). Selon cette perspective, les mouvements pourraient induire des changements au sein même des circuits moteurs, notamment dans la région de l'AMS, soit en affinant la sensibilité neuronale à la durée ou à des catégories temporelles spécifiques, qui sont activés par les réponses sensorielles et motrices, soit en modifiant la vitesse et la variance des trajectoires de l'espace d'état (Buonomano, 2014). Cette hypothèse est soutenue par des études chez les non-humains, démontrant que les trajectoires dynamiques de décharge neuronale dans les circuits moteurs codent la durée des intervalles (Sohn et al., 2019; Wang et al., 2018), et que ces dynamiques peuvent être généralisées à différents types de tâches de timing (Bi & Zhou, 2020). Cependant, cette hypothèse ne rend pas directement compte du fait que l'exécution d'un mouvement simultané à la tâche améliore la performance temporelle, plutôt que de l'altérer. Il est suggéré que lorsque les participants restent immobiles, ils sont confrontés à une variété de trajectoires de mouvement possibles et concurrentes, alors qu'en condition de mouvement, ils peuvent s'appuyer sur les signaux corollaires générés par le mouvement en cours pour ajuster dynamiquement les trajectoires neuronales (Kao et al., 2021). La préparation du mouvement offre également un mécanisme explicatif, car le mouvement spécifique à effectuer est préparé parmi plusieurs alternatives, ce qui transforme l'activité du cortex moteur en un état plus actif (Lara et al., 2018), transformant ainsi son état dynamique en un sous-espace fonctionnellement optimal pour l'exécution du mouvement anticipé (Kao et al., 2021). Bien que la présence d'une activation des régions motrices durant des tâches d'estimation temporelle perceptive soit bien établie, cela ne signifie pas nécessairement que les effets associés au mouvement prennent leur origine dans ces régions.

En effet, des travaux utilisant des réseaux neuronaux récurrents ont montré que des réponses temporellement précises peuvent être « apprises » par n'importe quelle région neuronale (Motanis et al., 2018; Zhou et al., 2020). Ainsi, l'activation des régions motrices observée lors de tâches de perception du temps pourrait refléter un épiphénomène lié aux mécanismes d'apprentissage des intervalles temporels (Coull & Droit-Volet, 2018).

Une alternative est l'hypothèse de la perception active, qui postule que l'activité motrice exerce une influence récurrente sur les régions sensorielles, modulant leurs activités neuronales de manière plus précise, bien que potentiellement biaisée. Ce cadre repose sur des travaux issus d'autres champs de recherche, qui montrent que les mouvements peuvent altérer et améliorer les réponses neuronales dans les aires sensorielles (Niell & Stryker, 2010; Yon et al., 2018). Dans ce cadre, l'activité motrice associée aux mouvements réalisés lors de l'estimation temporelle induit une modulation des réponses sensorielles, qui rétroagit sur les processus temporels moteurs. Plusieurs études supportent cette hypothèse, en montrant que les mouvements induisent des changements notables dans l'activité des aires sensorielles (Busse et al., 2017), améliorant la réponse neuronale aux stimuli (Musall et al., 2019). D'autres études rapportent également une relation étroite entre l'activité motrice et l'amélioration de la détection sensorielle (Cao & Händel, 2019; Tomassini et al., 2020). De plus, la planification du mouvement peut être décodée à partir des régions sensorielles associées aux conséquences du mouvement (Gale et al., 2021). Selon cette hypothèse les effets du mouvement dépendent de l'activité dans les cortex sensoriels, ce qui pourrait expliquer pourquoi les effets du mouvement sont en général plus marqués pour les intervalles « remplis » que pour les intervalles « vides » (Iwasaki et al., 2019). Toutefois, des effets du mouvement ont également été observés pour des intervalles vides (Iordanescu et al., 2013). De plus, des travaux ont montré que les conséquences sensorielles des mouvements planifiés (i.e., auto-initiés) suscitent moins d'activité sensorielle par rapport à des mouvements non-planifiés (i.e., initiés de façon externe) (Harrison et al.,

2021), ce qui devrait donc conduire à des durées perçues plus courtes (Noguchi & Kakigi, 2006), alors que l'on observe souvent le contraire.

1.2.3. L'influence de différents effecteurs

Les résultats suggèrent que le mouvement peut moduler la perception du temps (pour revue De Kock et al., 2021) et que les capacités de perception du temps peuvent prédire les capacités sensorimotrices (D'Andrea-Penna et al., 2020). Cette interaction peut s'expliquer notamment par la TTS (e.g., Kroger-Costa et al., 2013; Sayali et al., 2018), ou par le modèle de la CBI (De Kock et al., 2021, 2023). Toutefois, l'étude de cette interaction, nécessite de prendre en compte le contexte de la tâche, et plus particulièrement les effecteurs employés. En effet, Keele et al. (1985) posent une question fondamentale qui concerne le fait de savoir si différents effecteurs (e.g., doigts, bras, jambes) partagent des mécanismes d'estimation temporelle communs ou indépendants. Plusieurs études ont tenté d'y répondre avec l'hypothèse selon laquelle si deux activités motrices partagent des mécanismes temporels communs, lorsque deux mouvements sont paramétrés différemment sur le plan temporel, il se peut que leurs productions simultanées deviennent difficiles. Ainsi Yamanishi et al. (1980) ont montré que lorsque l'index de chaque main tapait à une fréquence d'une fois par seconde, le tapotement simultané des deux doigts produisait une interférence mutuelle, sauf si les doigts étaient synchronisés en phase ou en opposition de phase de 180 degrés. De même, Klapp (1979) a montré que lorsque les deux mains tapaient des rythmes légèrement différents, une interférence apparaissait dès lors que les cycles temporels des deux schémas n'étaient pas équivalents. Dans une étude suivante, Klapp (1981) retrouve des patterns similaires pour deux effecteurs très différents l'un de l'autre : la main et la voix. Une telle interférence, lorsque deux effecteurs suivent des rythmes temporels distincts, suggère l'existence d'un mécanisme commun aux effecteurs. Keele et al. (1985) ont investi cette question par une autre approche, avec l'hypothèse que si la même horloge, ou du moins certaines parties de celle-ci, sous-tend à la fois le timing moteur et perceptif, alors on

devrait observer des corrélations dans l'efficacité avec laquelle différents individus exécutent des tâches impliquant divers effecteurs, ainsi que des corrélations entre la tâche de timing explicite motrice et perceptive. Les résultats issus de leurs deux études supportent cette hypothèse. Ils démontrent d'une part que la performance temporelle (i.e., précision temporelle) lors d'une tâche de timing moteur est corrélée entre le pied et le doigt, supportant l'idée que différents effecteurs partagent des mécanismes du traitement temporel communs. D'autre part, ils démontrent une corrélation des performances temporelles entre la tâche de timing explicite perceptive et motrice, renforçant l'hypothèse de mécanismes communs.

1.3. Contrôle moteur et objectif temporel

Les travaux récents sur l'interaction entre le mouvement et la perception du temps sont notables et majeurs. Toutefois, alors que le mouvement est intrinsèquement lié à la perception du temps (pour revue Merchant & Yarrow, 2016), peu d'études considèrent directement les théories du contrôle moteur au sein de cette interaction, soulignant l'intérêt de collaborations entre ces deux champs de recherche (De Kock et al., 2021). En parallèle, dans le domaine du contrôle moteur et notamment pour le mouvement d'atteinte du corps entier (WBR), cette relation et la place de l'objectif temporel explicite restent sous-explorée. Les recherches sur le mouvement d'atteinte ont principalement mis en évidence que l'organisation motrice s'adapte aux contraintes spatiales. En revanche, l'effet d'un objectif temporel explicite sur l'organisation du mouvement d'atteinte, au-delà des ajustements de vitesse (e.g., effectuer un mouvement rapidement, naturellement ou lentement ; Casteran et al., 2013), a rarement été examiné (e.g., Fautrelle et al., 2015; Thomas et al., 2019). Dans cette section, nous présenterons le mouvement d'atteinte du corps entier (WBR), les études portant sur le contrôle moteur de ce type de mouvement, ainsi que les principaux modèles théoriques.

1.3.1. Le mouvement d'atteinte du corps entier

L'étude du contrôle moteur s'est principalement appuyée sur des paradigmes impliquant des mouvements de pointage simples, réalisés avec le membre supérieur dans des conditions posturales stables (Morasso, 1981; Papaxanthis et al., 2003). Par la suite, certains travaux ont élargi ce champ aux mouvements incluant l'inclinaison du tronc (Kaminski et al., 1995). Cependant, ces approches ne reflètent que partiellement la complexité des actions motrices que l'humain accomplit au quotidien, souvent en posture debout, dans des situations où la stabilité posturale est activement sollicitée. C'est dans cette optique qu'ont été développés des paradigmes plus écologiques tels que le mouvement d'atteinte du corps entier (*whole-body reaching* (WBR) en anglais ; voir Figure 8; Berret et al., 2009; Casteran et al., 2013; Pozzo et al., 1995; Stapley et al., 1999). Ces paradigmes permettent d'étudier la coordination motrice dans des situations où les contraintes biomécaniques, focales et posturales, et environnementales interagissent de manière étroite. Le WBR se situe ainsi à l'extrémité d'un continuum de complexité, allant du simple mouvement de doigt (ex. appui sur un bouton) à l'engagement intégral du corps, qui varie entre autres selon : les degrés de liberté, les contraintes posturales et la charge imposée au SNC.

Le paradigme du WBR permet une investigation aussi bien des phases de préparation que d'exécution d'un mouvement écologique, notamment à travers l'analyse des ajustements posturaux anticipés (APAs) et des paramètres électromyographiques (EMG) et cinématiques. Les APAs seraient en partie générées par l'AMS (Jacobs et al., 2009) et elles jouent un rôle fondamental dans l'initiation du mouvement (Stapley et al., 1999 ; Pozzo et al., 2001), en préparant le système aux perturbations induites par le déplacement du centre de masse (CoM), tout en assurant l'alignement des segments corporels. Il a été démontré que l'organisation spatio-temporelle des APAs est modulée par divers paramètres du mouvement focal : direction (Aruin & Latash, 1995), amplitude (Aruin & Shiratori, 2004), précision spatiale (Bonnetblanc

et al., 2004 ; Bertucco & Cesari, 2010), et vitesse (Horak et al., 1984 ; Shiratori & Aruin, 2007). De façon intéressante, Esposti et al. (2015) soulignent que, malgré de nombreuses données sur la relation entre les APAs et la vitesse de mouvement, notamment la dépendance de la latence des APAs à la vitesse du mouvement (Horak et al., 1984 ; Lee et al., 1987 ; Shiratori & Aruin, 2007), la question de savoir si cette latence est déterminée par la vitesse prévue ou la vitesse réelle du mouvement demeure non résolue. Leurs résultats montrent que l'intention de vitesse (i.e., l'objectif temporel) joue un rôle déterminant dans la modulation temporelle des APAs, plutôt que la vitesse effectivement réalisée, suggérant que les objectifs temporels sont intégrés dès les premières phases de la préparation motrice. On note également qu'il a été démontré que la MP, chez qui on observe aussi des troubles de la perception du temps, se caractérise par une altération du fonctionnement des APAs ainsi que par une diminution de l'amplitude et une modification du timing des APAS lors de l'initiation de la marche.

Lors des mouvements de WBR, les études ont mis en évidence des coordinations intersegmentaires caractérisées par une covariation angulaire et une structure hiérarchique de la commande (Berret et al., 2009; Chiovetto et al., 2010). L'analyse des angles d'élévation et du centre de masse a révélé que la cinématique des mouvements de WBR varie en fonction de la vitesse du mouvement. Par exemple, dans l'étude de Casteran et al. (2013), les participants devaient effectuer un mouvement de WBR rapidement, naturellement ou lentement. Par une analyse en composantes principales, ils ont montré que le degré de covariation entre les angles d'élévation du corps ne variait pas avec la durée du mouvement. Cette stabilité de la coordination contrastait avec de légères différences spatiales et temporelles observées dans les trajectoires individuelles des angles d'élévation, des marqueurs articulaires et du centre de masse. Les modifications concernaient principalement les caractéristiques spatiales des angles d'élévation, plus marquées pour les mouvements de courte que de longue durée. En revanche, les caractéristiques temporelles des angles d'élévation (e.g., temps du pic de vitesse angulaire),

n’ont pas été modifiées de manière similaire, indiquant ainsi une dissociation dans l’ajustement des aspects spatiotemporels des angles d’élévation. L’étude des profils de vitesse des marqueurs articulaires a également révélé une organisation temporelle différente, avec les temps des pics de vitesse suivant l’ordre des vitesses : rapide, puis naturelle, puis longue. Enfin, bien que des différences existent dans les trajectoires cinématiques selon la vitesse, l’ACP a montré que deux composantes principales suffisaient à expliquer la quasi-totalité de la variance, indiquant que les trajectoires ne résultent pas d’un simple redimensionnement temporel.

L’ensemble de ces observations suggèrent que la préparation et l’exécution motrice pourraient également être modulée selon un objectif temporel explicite, et impliqueraient une révision des modèles de contrôle moteur, afin d’y intégrer explicitement les objectifs temporels, au même titre que les objectifs spatiaux. Ainsi, dans la section suivante nous décrirons les modèles internes des mouvements d’atteinte.

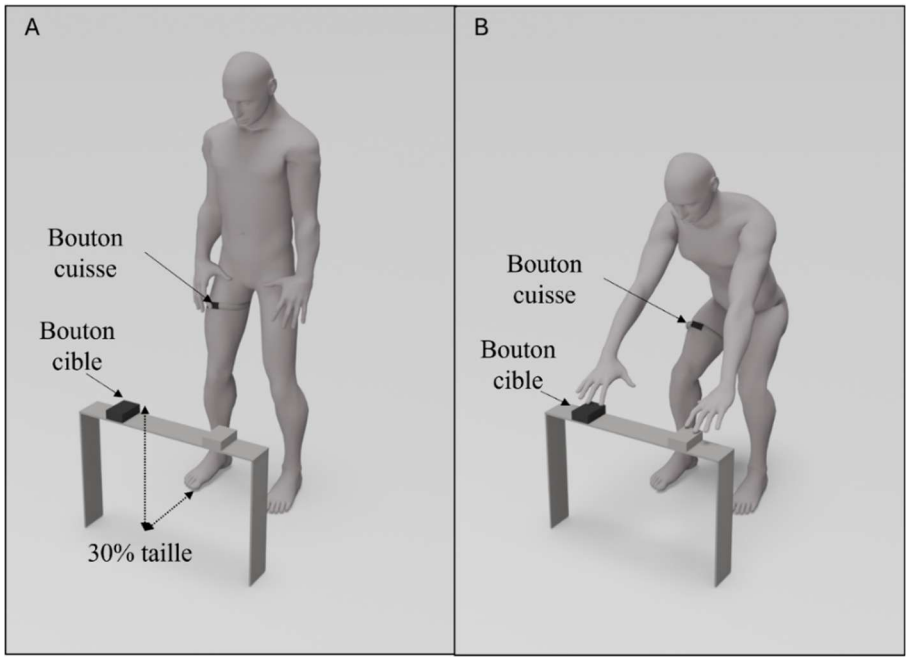


Figure 8 : Mouvement d'atteinte du corps entier

***A** Visualisation de la position initiale. La cible a été positionnée à 30 % sur l'axe antéropostérieur et sur l'axe vertical. Le bouton de la cuisse et le bouton de la cible sont*

représentés en noir. ***B*** *Visualisation de la position finale après le mouvement d'atteinte du corps entier. Le bouton de la cuisse et le bouton de la cible sont représentés en noir*

1.3.2. Théorie du contrôle moteur

1.3.2.1. Modèle interne en boucle fermée

Le modèle en boucle fermée, proposé initialement par Adams (1971), constitue l'un des premiers cadres théoriques pour expliquer le contrôle du mouvement. Il repose sur l'idée que les mouvements sont régulés en continu grâce aux retours sensoriels (*feedback* en anglais) issus du mouvement en cours. Ce modèle postule l'existence de deux traces mnémoniques distinctes : la trace de mémoire, représentant un programme moteur stocké en mémoire à long terme, et la trace perceptuelle, construite à partir du retour sensoriel issu de la réponse correcte. Le système nerveux central (SNC) compare en temps réel le feedback produit par le mouvement avec cette trace perceptuelle, permettant des ajustements correctifs continus pour minimiser l'écart entre l'action en cours et l'objectif à atteindre.

Cependant, ce modèle présente plusieurs limites. Le traitement des informations afférentes nécessite un temps non négligeable, ce qui compromet son efficacité pour des mouvements rapides ou de courte durée. De plus, les études sur la désafférentation, notamment chez les patients atteints de neuropathies sensitives ou dans des contextes expérimentaux impliquant l'anesthésie des afférences, ont montré que certains mouvements peuvent être exécutés de manière relativement précise en l'absence de retours sensoriels, remettant en question la nécessité d'un retour sensoriel en temps réel dans toutes les formes de contrôle moteur.

1.3.2.2. Modèle interne en boucle ouverte

En réponse aux limitations du modèle en boucle fermée, le modèle en boucle ouverte a été proposé par Schmidt (1975). Ce modèle suggère un contrôle moteur fondé sur l'exécution

de programmes moteurs préstructurés, sans recours aux afférences sensorielles pendant l'action. Inspiré des travaux antérieurs de Keele & Posner (1968), ce modèle suppose que la commande motrice est entièrement spécifiée avant l'initiation du mouvement. L'exécution motrice procède alors de manière automatique selon un contrôle en boucle ouverte (*feedforward* en anglais), sans ajustement en ligne. Néanmoins, ce modèle soulève plusieurs problèmes. Premièrement, il ne permet pas la correction des erreurs pendant le mouvement. Deuxièmement, il pose des contraintes importantes sur la capacité de stockage et d'organisation des programmes moteurs, notamment pour des mouvements nouveaux ou inhabituels. Enfin, l'ignorance totale des retours sensoriels limite la flexibilité et l'adaptabilité du système moteur pour la réalisation de nouveaux mouvements.

1.3.2.3. Modèle hybride du contrôle continu

Le modèle hybride proposé par Desmurget & Grafton (2000) combine les modèles en boucle fermée et en boucle ouverte, intégrant à la fois des processus de planification motrice a priori (programmes moteurs) et des ajustements en ligne basés sur les retours sensoriels et les prédictions internes. Selon Desmurget et Grafton (voir Figure 9), dans le cas d'un mouvement de bras, un plan moteur est initialement défini grâce à un modèle inverse à partir des positions de la main et de la cible et du but du mouvement. Au cours du mouvement, un modèle interne prédictif du bras est généré. Ce modèle interne prédictif reçoit en entrée le retour sensoriel ainsi qu'une copie de la commande motrice, et produit en sortie une estimation de la position finale du mouvement. Cette estimation est ensuite comparée à la position de la cible. En cas de divergence, un signal d'erreur est généré, entraînant une correction de la commande motrice en cours.

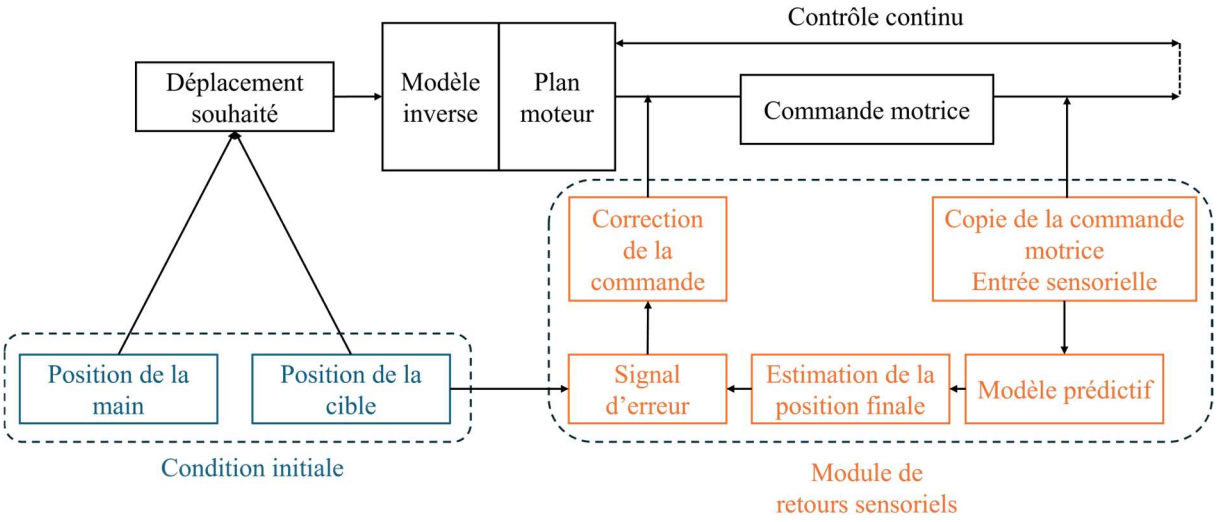


Figure 9 : Modèle hybride du contrôle continu

Représentation des circuits hybrides simplifiés intégrant un modèle interne prédictif de la dynamique du bras pour le contrôle des mouvements de la main, selon Desmurget & Grafton (2000). Figure adaptée de Desmurget & Grafton (2000).

La proposition de correction en ligne du mouvement basée sur des prédictions internes et des retours sensoriels est soutenue par des travaux ayant étudié les mécanismes de correction motrice. En particulier, les paradigmes de pointage à double saut ont permis d'identifier les délais minimaux nécessaires à l'implémentation de corrections motrices au cours de l'exécution du geste. Ces études montrent que, pour des mouvements effectués en position assise et limités aux membres supérieurs, le SNC est capable de générer des corrections à partir des afférences visuelles, en comparaison avec une copie d'efférence, avec des délais de l'ordre de 120 à 150 ms (Desmurget et al., 1999; Paillard, 1996; Prablanc & Martin, 1992). Ces délais témoignent de la capacité du système à intégrer des informations sensorielles en temps réel pour moduler la commande motrice en cours, suggérant l'existence d'un contrôle en ligne complémentaire à la planification initiale. Toutefois, lorsque les tâches motrices nécessitent une coordination plus globale du corps, impliquant simultanément les membres supérieurs et inférieurs, les délais de correction motrice apparaissent significativement plus courts (Fautrelle, Ballay, et al., 2010).

Dans l'étude de Fautrelle, Prablanc, et al. (2010), des participants en position debout devaient pointer vers une cible qui pouvait, de manière imprévisible, sauter en avant vers une nouvelle position fixe. Les corrections motrices ont été analysées à partir des réponses EMG de différents muscles. Leurs résultats montrent que les premières réponses différentielles entre conditions perturbées et non perturbées apparaissent avec des latences inférieures à 100 ms, à la fois dans le deltoïde antérieur et le tibial antérieur. Ces délais extrêmement courts suggèrent la mobilisation de boucles sensori-motrices rapides, potentiellement sous-corticales, permettant des ajustements automatiques et localisés sans nécessairement impliquer les circuits corticaux.

Le modèle hybride proposé par Desmurget et Grafton (2000) et les études portant sur les corrections motrices portent principalement sur des paradigmes dans lesquels l'objectif moteur est défini spatialement (e.g., tâche de pointage vers une cible dont la localisation pouvait être perturbée en cours de mouvement). Si ces travaux ont démontré la flexibilité du contrôle moteur dans un espace visuel dynamique, peu ont étudié la possibilité que des corrections en ligne puissent également être déclenchées par des objectifs temporels, et plus précisément par une durée de mouvement explicite.

Parmi les quelques travaux s'étant penchés sur cette dimension temporelle (e.g., Fautrelle et al., 2015; Gavazzi et al., 2013), Thomas et al. (2019) ont utilisé un paradigme impliquant des séquences temporelles régulières ou irrégulières auxquelles les participants devaient réagir à chaque stimulus en appuyant sur un bouton par un mouvement de WBR. Les auteurs ont montré que la régularité temporelle modifiait non seulement les temps de réaction, mais aussi les dynamiques d'activation musculaire au cours du mouvement. En condition régulière, la réponse motrice s'optimisait progressivement, avec une réduction simultanée du temps de réponse, de la latence EMG, et de l'amplitude d'activation musculaire, en particulier dans les muscles posturaux comme le tibial antérieur et le soléaire. Ces résultats montrent que la prévisibilité temporelle peut induire des ajustements en ligne, impliquant à la fois des

processus d'anticipation et d'adaptation motrice. Ainsi, bien que la littérature sur le contrôle moteur ait largement privilégié des objectifs de dimension spatiale, les résultats de Thomas et al. (2019) suggèrent que des mécanismes analogues peuvent s'appliquer à la dimension temporelle.

1.3.3. Contrôle moteur et perception du temps

Traditionnellement, dans l'étude de la perception du temps, le mouvement est considéré comme un simple outil méthodologique, au même titre que d'autres modulateurs tels que l'éveil, l'attention ou l'émotion (e.g., Brown & Stubbs, 1992; Droit-Volet, 2013; Gil & Droit-Volet, 2012; Volkinburg & Balsam, 2014). Cette perspective tend à réduire le mouvement comme étant une conséquence du traitement temporel dans le cadre d'une horloge interne centrale « tyrannique » (pour revue Burle et al., 2005) ou un facteur contextuel influençant l'attention ou l'éveil (e.g., Kroger-Costa et al., 2013; Sayali et al., 2018). Cette approche tend à maintenir séparés deux champs de recherche, le contrôle moteur et la perception du temps, qui sont pourtant liés. En effet, dans une revue de la littérature, Merchant & Yarrow (2016) proposent que le système moteur joue un rôle central dans la perception du temps. Ils mettent en évidence l'existence d'un réseau de structures, incluant notamment le cortex moteur et l'AMS, interagissant avec les systèmes sensoriels pour permettre la production et la perception d'intervalles. Ce réseau génère également des signaux prédictifs permettant d'anticiper la survenue d'événements sensoriels et moteurs, indépendamment de la modalité impliquée. Au-delà de cette fonction prédictive, ils soulignent également que nos mouvements peuvent moduler l'estimation temporelle, supportant l'idée d'une interaction bidirectionnelle entre mouvement et perception temporelle. Cette perspective plaide pour un modèle intégré dans lequel le système moteur ne se limite pas seulement à l'exécution d'un programme moteur, mais participe activement à l'estimation temporelle. Cette perspective fait écho à la revue de la littérature de Burle et al. (2005) traitant de la nature du contrôle temporel des mouvements.

Selon une conception centraliste, une horloge interne fournit une référence temporelle qui permet au système moteur de programmer explicitement la durée des réponses. À l'inverse, les conceptions dites dynamistes (Kugler et al., 1980; Scott Kelso et al., 1981) défendent l'idée qu'il n'existe pas de primauté d'une commande centrale et que la durée d'un mouvement n'est que le sous-produit des propriétés physiques des effecteurs (e.g., rigidité, viscosité ou inertie) et de leur interaction avec les contraintes environnementales et neuronales. Comme l'ont formulé Viviani & Laissard (1991), la question est donc de savoir si la structure temporelle des séquences motrices est dictée par un module fonctionnel spécialisé, localisé dans le système nerveux, ou si elle constitue une propriété émergente des processus d'implémentation.

L'analyse de Burle et al. (2005) apporte plusieurs arguments en faveur de l'idée que le temps peut être contrôlé explicitement et indépendamment de la dynamique motrice. Sur le plan comportemental par exemple, l'effet « court–long » introduit par Klapp et al. (1974) a pu être mis en évidence. Dans une tâche de temps de réaction (TR), les participants devaient maintenir un appui sur une clé Morse pendant un intervalle court (150 ms) ou long (600 ms). En condition de TR de choix, les participants ne connaissaient pas à l'avance la durée de l'appui à produire, tandis qu'en TR simple, cette information leur était donnée à l'avance. Les auteurs ont observé un allongement du TR lorsque la réponse à produire était longue comparée à une réponse courte en condition de TR de choix, mais aucune différence en condition de TR simple. Cette différence a été interprétée comme le reflet du temps nécessaire à la programmation motrice. En TR de choix, la programmation s'effectue après l'apparition du stimulus, de sorte que la phase de programmation est incluse dans le TR mesuré. En revanche, en TR simple, la durée étant connue à l'avance, la programmation s'effectue en amont. Ces résultats suggèrent ainsi que la durée d'une réponse motrice peut être spécifiée dans un programme moteur et qu'elle requiert un temps de préparation distinct. Sur le plan électrophysiologique, Vidal et al. (1995) ont étudié l'activité EEG lors d'une tâche de TR similaire. En plus de la réplication de

l'effet « court – long », ils observent qu'au début de la phase préparatoire, l'activité EEG enregistrée au-dessus de l'AMS variait en fonction de la durée de la réponse à produire, alors qu'aucune différence n'était observée au niveau des aires sensorimotrices primaires (SM1) controlatérales. En fin de phase de préparation, ils observaient l'inverse : l'activité de SM1 variait selon la durée de la réponse à produire, tandis qu'aucune modulation n'était observée au niveau de l'AMS. Ces résultats renforcent l'idée que les processus de programmation se produisent pendant la période de préparation lorsque la durée d'une réponse à produire est connue d'avance, avec une programmation initiale au niveau de l'AMS, suivi d'un transfert vers M1, juste avant le début du mouvement, pour l'exécution. Ils renforcent l'idée selon laquelle la durée du mouvement peut être intégrée dans le programme moteur. Un argument supplémentaire provient des études en imagerie motrice. Bonnet et al. (1998) ont montré que la temporalité d'une séquence pouvait être représentée et régulée de manière interne au moment approprié, même en l'absence de tout mouvement effectif. Cette observation exclut une interprétation strictement fondée sur la dynamique périphérique et suggère que l'objectif temporel constitue une variable que le système moteur est capable d'intégrer et de traiter en tant que telle. Enfin, Burle et al. (2005) concluent que lorsque des mouvements impliquent un déplacement réel dans l'espace, et non un simple changement de force, le rôle central de l'horloge interne est relativisé. Celle-ci doit communiquer avec le système moteur, dont l'influence devient alors significative. Ils proposent que dans des situations où la dynamique du mouvement prend une importance majeure (e.g., selon les articulations mises en jeu, ou lorsqu'une vitesse d'exécution trop élevée atteint les limites biomécaniques du système moteur), l'horloge, bien qu'encore présente, devient à son tour négligeable. Ils suggèrent ainsi l'existence d'un équilibre fonctionnel entre l'horloge interne et le système moteur, suggérant que le contrôle temporel résulte d'une interaction dynamique plutôt que d'une domination de l'un ou de l'autre.

Dans une revue de la littérature, De Kock et al. (2021) soulignent que la perception du temps n'est pas uniquement modulée par le mouvement lorsqu'il est concomitant, mais aussi par la phase précédant et suivant l'exécution du mouvement (e.g., Hagura et al., 2012; Iwasaki et al., 2017; Nazari et al., 2017; Yabe & Goodale, 2015). Avant l'action, certaines études rapportent des dilatations de la durée perçue, notamment en fonction de la direction prévue du mouvement (e.g., droite et gauche ; Tomassini & Morrone, 2016), ainsi qu'une accélération du traitement visuel visant à maximiser les possibilités d'interrompre ou de réorienter une action planifiée (e.g., Hagura et al., 2012), ce qui conduit à des intervalles perçus plus longs. Cette hypothèse a été étayée par des observations montrant que, pendant la préparation de mouvements de pointage balistiques dans une tâche de discrimination temporelle, des intervalles visuels remplis sont jugés plus longs (Hagura et al., 2012). Après le mouvement, des décalages temporels sont également observés (e.g., Terhune et al., 2016; Yarrow & Rothwell, 2003). Selon les auteurs de la revue, ces biais temporels pré- et post-mouvement indiquent un encodage neuronal dynamique du temps relatif à l'initiation de l'action, compatible avec des principes généraux du contrôle moteur : signaux pré-action anticipatoires et prédictifs, et signaux post-action d'évaluation et de corrections (Shadmehr et al., 2010), rarement examinés dans le cadre du timing explicite. Selon De Kock et al. (2021), cette perspective ouvre un champ de recherche prometteur et plaide pour des collaborations intégrant des expertises complémentaires en contrôle moteur et en timing.

Chapitre 2 : Problématiques, objectifs et hypothèses

« Apprendre d'hier, vivre aujourd'hui, espérer pour demain. L'important est de ne pas arrêter de poser des questions. » Albert Einstein

2.1. Synthèse du cadre théorique et problématique

L'interaction continue avec un environnement changeant repose sur des capacités de perception du temps (i.e., timing) qui permettent d'interagir avec celui-ci. Dans notre vie quotidienne, la gestion du temps se manifeste souvent à travers des actions motrices, et ce lien est supporté par des données d'imagerie cérébrale montrant que les mêmes régions du cerveau se sont ainsi spécialisées fonctionnellement pour ces processus distincts, mais fréquemment coïncidents (Chen et al., 2008; Coull et al., 2011, 2016; Gordon et al., 2018; Grahn & Brett, 2007; Ross et al., 2018; Wiener et al., 2010a). Parmi les zones cérébrales identifiées comme impliquées à la fois dans les tâches de perception du temps et les tâches motrices, l'aire motrice supplémentaire (AMS) semble jouer un rôle majeur. Il a été montré que l'AMS est impliquée dans les tâches temporelles (Coull et al., 2016; Macar et al., 1999; Pfeuty et al., 2019; Wiener et al., 2010a) et qu'elle joue un rôle crucial dans les tâches motrices, en particulier dans le développement de l'intention d'agir et la spécification et l'élaboration de l'action (Goldberg, 1985; Tanji, 1994). Néanmoins, jusqu'à récemment, ce lien entre le mouvement et la perception du temps a été relativement peu exploré (pour revue Balasubramaniam et al., 2021 ; De Kock et al., 2021).

Des études récentes ont investigué divers types de mouvements impliquant un ou plusieurs segments de membres, diverses tâches temporelles de type rythmique (e.g., tapping) ou non rythmique (e.g., reproduction temporelle), motrices ou perceptuelles et impliquant des durées allant de plusieurs millisecondes à plusieurs secondes (Allingham et al., 2021 ; Castellotti et al., 2022 ; D'Andrea-Penna et al., 2020 ; De Kock et al., 2023 ; Fautrelle et al., 2015 ; Guo et al., 2019 ; Kroger-Costa et al., 2013 ; Miura et al., 2018 ; Press et al., 2014 ; Ravi et al., 2021 ; Sayali et al., 2018 ; Terrier, 2019 ; Tomassini & Morrone, 2016 ; Wiener et al., 2019 ; Yokosaka et al., 2015 ; Yon et al., 2017). Par exemple, il a été montré qu'un entraînement moteur induit une stabilisation spatio-temporelle de l'acte moteur à l'origine d'une amélioration

des performances de discrimination temporelle pour les intervalles de temps entrainés (Guo et al., 2019). Par ailleurs, Wiener et al. (2019) ont montré que le fait de laisser le mouvement libre pendant l'estimation d'un intervalle permet d'améliorer le jugement temporel dans des tâches perceptives et motrices comparativement à une condition sans mouvement, ce qui suggère que le système moteur influence directement la perception temporelle. D'autre part, par l'étude des réponses cérébrales évoquées en EEG (onde N1-P2), il a été montré que les personnes ayant une meilleure capacité de perception du temps sont également celles ayant une meilleure capacité à se synchroniser à un métronome (D'Andrea-Penna et al., 2020). Ainsi, les travaux récents démontrent une relation réciproque : le mouvement modifie la perception du temps d'une part, et les capacités du jugement temporel prédisent les capacités sensorimotrices d'autre part.

Malgré les avancées considérables réalisées dans le champ de la perception du temps, les recherches antérieures se sont principalement basées sur des mouvements à une seule articulation, comme l'appui sur un bouton avec un doigt. En contrepartie, les mouvements polyarticulaires (i.e., impliquant l'ensemble du corps), qui sont plus écologiquement valables dans les contextes quotidiens (e.g., ramasser un objet au sol), ont reçu relativement peu d'attention (De Kock et al., 2021; Fautrelle et al., 2015; Gavazzi et al., 2013). Ainsi, de nombreuses questions restent ouvertes. Dans le cadre d'un modèle d'horloge interne, la propriété scalaire, caractéristique de la TTS, est-elle préservée lors de tâches de reproduction temporelle impliquant des mouvements complexes tels que le WBR, comparativement aux tâches basées sur des mouvements simples ? Deuxièmement, comment la complexité du mouvement affecte-t-elle la perception du temps ? Autrement dit, les mécanismes temporels sont-ils influencés par la planification et l'exécution associées à la complexité motrice ?

Par ailleurs, les études ont démontré que l'organisation motrice varie en fonction des contraintes spatiales. En revanche, très peu se sont intéressées à l'influence d'objectif temporel

explicite sur l'organisation motrice d'un mouvement complexe (e.g., Thomas et al., 2019), en dehors des modifications de vitesse (e.g., Casteran et al., 2013). Une première question se pose : un individu est-il capable de reproduire précisément une durée fixe imposée lors d'un mouvement de WBR ? De plus, est-ce que l'intégration d'un objectif temporel dans la planification et l'exécution du WBR modifie-t-elle l'organisation motrice par rapport à un WBR sans contrainte temporelle, mais de durée équivalente ? Plus précisément, les APAs, qui reflètent les processus de préparation du mouvement, varient-ils en fonction de l'intention temporelle ? De même, le contrôle en ligne du mouvement permet-il de réguler le mouvement en fonction de l'objectif temporel ? Ces considérations ouvrent également la voie à des investigations plus exploratoires : certaines stratégies motrices sont-elles plus efficientes que d'autres pour atteindre une précision temporelle optimale ?

Concernant le rôle prédictif des capacités de jugement temporel sur la performance sensorimotrice, tel que suggéré par les travaux de D'Andrea-Penna et al. (2020), plusieurs interrogations demeurent. L'une des premières concerne la stabilité et la fidélité de l'IRT. Ce marqueur présente-t-il une robustesse suffisante pour être considéré comme un indicateur des performances temporelles d'une tâche de synchronisation ? Une autre question est celle de la généralisation de cette relation à d'autres types de tâches temporelle, notamment aux tâches de timing moteur non rythmiques. Autrement dit, est-ce que l'IRT est aussi prédicteur des performances temporelles d'une tâche de reproduction, qu'il s'agisse d'un mouvement de doigt ou d'un WBR ? Si tel est le cas, cet indicateur pourrait constituer un marqueur général des performances temporelles et sensorimotrices.

L'originalité de cette thèse réside dans sa tentative de considérer dans son ensemble deux champs théoriques souvent étudiés séparément : la perception du temps et le contrôle moteur. Ainsi, nous nous intéressons dans une première expérimentation aux mécanismes de perception du temps et du contrôle moteur. Pour ce faire, nous emploierons une tâche de timing

moteur explicite : la reproduction temporelle. Cette tâche illustre bien la nécessité d'une communication étroite entre les mécanismes temporels et le contrôle moteur, notamment dans le cadre d'un mouvement de WBR. Elle requiert la perception d'un intervalle cible, sa mémorisation, son implémentation au sein d'un programme moteur, son exécution et une adaptation du mouvement en fonction de cet intervalle de temps pour atteindre l'objectif. De plus, nous nous intéresserons aux capacités à effectuer un mouvement de WBR selon un objectif temporel et à déterminer leur place dans le cadre des théories du contrôle moteur. Dans une seconde expérimentation, nous nous intéresserons à examiner la valeur prédictive des capacités de perception du temps pour les performances sensorimotrices. Plus précisément, nous nous appuyons sur l'étude du marqueur neuronal IRT (i.e., complexe N1-P2) proposé par D'Andrea-Penna et al. (2020), qui serait un marqueur neuronal général du traitement temporel, afin de déterminer si celui-ci est généralisable à plusieurs tâches de timing moteur (rythmique et non rythmique), indépendamment du type de mouvement impliqué (doigt et WBR).

2.2. Objectifs et hypothèses

Objectif 1 (Expérimentation 1 – Etude 1) : Examiner les différences de performances lors d'une tâche de reproduction temporelle avec des mouvements de WBR par rapport à un mouvement du doigt.

1.1. Hypothèse 1 : Sur la base du cadre de la CBI, nous émettons l'hypothèse que les mouvements de WBR fourniraient un canal supplémentaire d'indices temporels, réduisant ainsi la variabilité des durées reproduites (De Kock et al., 2023).

1.2. Hypothèse 2: Conformément au modèle SET et à la proposition selon laquelle le mouvement accélère le rythme de l'oscillateur, nous émettons l'hypothèse d'une réduction de la variabilité temporelle et d'une sous-reproduction de chaque IC lors des mouvements de WBR comparés aux mouvements du doigt (Kroger-Costa et al., 2013; Sayali et al., 2018)

1.3. Hypothèse 3 : Sur la base du modèle SET et de la suggestion selon laquelle le mouvement peut moduler l'attention, nous prédisons que les mouvements de WBR entreront en compétition pour les ressources attentionnelles pendant la phase de reproduction, conduisant à un nombre réduit d'impulsions accumulées et résultant en une sur-reproduction, quel que soit l'IC, comparativement aux mouvements du doigt (Kroger-Costa et al., 2013).

1.4. Hypothèse 4 : Compte tenu des résultats antérieurs montrant que le mouvement module la durée perçue en fonction de sa vitesse, nous nous attendons à des différences de précision temporelle entre les mouvements de WBR et les mouvements du doigts, ainsi qu'entre les différents IC pour le mouvement de WBR.

Objectif 2 (Expérimentation 1 – Etude 2) : Identifier les différences dans les stratégies motrices entre les mouvements de WBR avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement identique.

2.1. Hypothèse 1 : Nous prédisons des différences dans la phase de préparation du mouvement entre les mouvements de WBR réalisés avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement équivalente.

2.2. Hypothèse 2 : Nous prédisons des différences dans la phase d'exécution du mouvement entre les mouvements de WBR réalisés avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement équivalente.

Objectif 3 (Expérimentation 1 – Etude 3) : Analyser les stratégies motrices selon la durée de l'objectif temporel et identifier les stratégies motrices associées à une meilleure capacité de régulation d'un mouvement de WBR contraint temporellement.

3.1. Hypothèse 1 : Nous émettons l'hypothèse que l'organisation motrice varie en fonction de la durée de l'objectif temporel. Plus spécifiquement, nous nous attendons à observer

davantage de correction du mouvement pour des durées longues que pour des durées courtes, du fait qu'il y a plus de temps disponible pour apporter des corrections.

3.2. Hypothèse 2 : Nous supposons une activité en phase de préparation plus importante pour des durées courtes que pour des durées longues, en raison de l'augmentation des contraintes biomécaniques pour des mouvements rapides.

3.3. Hypothèse 3 : De façon exploratoire, nous souhaitons identifier si certaines stratégies motrices spécifiques sont associées à de meilleures performances dans une tâche de reproduction temporelle avec un mouvement de WBR, en fonction des différents objectifs temporels.

Objectif 4 (Expérimentation 2) : Déterminer si la capacité de perception du temps, telle que capturée par l'IRT, peut constituer un marqueur neuronal du traitement temporel en général et prédire les performances temporelles de différentes tâches de timing moteur.

4.1. Hypothèse 1 : Le corrélat neurophysiologique IRT proposée par D'Andrea-Penna et al. (2020), reflétant les capacités de perception temporelle, prédit la performance de reproduction temporelle avec un mouvement de doigt et de WBR.

4.2. Hypothèse 2 : L'IRT prédit la performance sensorimotrice d'une tâche de synchronisation.

Chapitre 3 : Contributions expérimentales

« Rien ne vaut la recherche lorsqu'on veut trouver quelque chose. » J.R.R. Tolkien

3.1. Méthodologie Générale

3.1.1. Cadre du projet doctoral

La première expérimentation avait pour enjeu de répondre aux trois premiers objectifs de la thèse. Les participants ont effectué un ensemble de tâches, permettant d'étudier d'une part l'effet du mouvement de WBR sur les performances temporelles lors d'une tâche de reproduction temporelle par rapport à un mouvement de doigt. D'une autre part, d'étudier la dimension temporelle au sein de l'organisation motrice d'un mouvement de WBR. Ce travail a été mené au sein du laboratoire 2LPN (Université de Lorraine), en collaboration avec Micha Pfeuty (Université de Bordeaux, CNRS, INCIA, UMR 5287, 33000 Bordeaux, France) et Elizabeth Thomas (Université de Bourgogne Europe, INSERM/U1093 CAPS, UFR STAPS, 21000 Dijon, France).

La deuxième expérimentation visait principalement à répondre au quatrième objectif, à savoir d'étudier l'effet prédicteur de l'IRT sur les performances temporelles d'une tâche de timing moteur rythmique et non-rythmique. Cette deuxième expérimentation permit également de complémenter la première, en étudiant les performances temporelles lors d'une tâche de reproduction temporelle avec un mouvement de WBR et de doigt dans des conditions différentes. Ce travail a été mené en collaboration avec le Prof. Dr. Axel Mecklinger (Experimental Neuropsychological Unit, Department of Psychology, Saarland University, Saarbrücken, Germany), Dr. Véronique Huffer (Experimental Neuropsychological Unit, Department of Psychology, Saarland University, Saarbrücken, Germany) et Micha Pfeuty (Université de Bordeaux, CNRS, INCIA, UMR 5287, 33000 Bordeaux, France), au sein du laboratoire « The Experimental Neuropsychology Unit » (Saarland University, Saarbrücken, Germany). L'expérimentation a été préenregistrée sur la plateforme OSF avant le début de la collecte des données, comprenant la formulation des hypothèses, la description détaillée du protocole expérimental et la stratégie d'analyse prévue. Le plan préenregistré sera rendu public

à l'issue de la publication de l'article en lien avec l'expérimentation. Les données en lien avec l'étude seront également mises à disposition publiquement sur une plateforme (e.g., OSF).

3.1.2. Considération éthique

L'ensemble des travaux a respecté la déclaration d'Helsinki (1975, 2002) ainsi que la loi Jardé (loi n° 2012-300 du 5 mars 2012 relative aux recherches impliquant la personne humaine, modifiée par l'ordonnance n° 2016-800 du 16 juin 2016). Aussi, avant le début de chaque collecte de données, les études ont été déclarées à la Commission Nationale de L'informatique et des Libertés (CNIL). Les volontaires ont été informés que les résultats de l'étude seraient potentiellement diffusés sous forme de présentations lors de congrès scientifiques, publications scientifiques ou thèse, sans pour autant rendre possible l'identification des participants.

L'expérimentation 1 se déroula en laboratoire (2LPN, Metz, France) et a été réalisée sur la base du volontariat de jeunes adultes sains. L'expérimentation impliquait des mesures EMG, cinématiques et comportementales. Avant chaque expérimentation, les volontaires ont reçu une note d'information. Celle-ci précisait que notre travail de recherches s'inscrivait dans un projet plus large, s'intéressant aux liens entre les capacités de jugement temporel et l'organisation motrice. Cette note d'information spécifiait le contenu de l'étude, les objectifs, les formes de publication, les conditions d'anonymat et de confidentialité, les bénéfices et les contraintes d'une éventuelle participation. Les participants ont été informés que les données recueillies restaient confidentielles. Cette note d'information était accompagnée d'un formulaire de consentement. Le jour de l'étude et avant de commencer le recueil de données, l'investigateur a expliqué au participant qu'il lui était possible de se retirer de l'étude à tout moment et sans aucune répercussion.

L'expérimentation 2 se déroula en laboratoire (Experimental Neuropsychological Unit, Department of Psychology, Saarland University, Saarbrücken, Germany) et a été réalisée sur la base du volontariat de jeunes adultes sains. L'expérimentation impliquait des mesures EEG et comportementales. Avant chaque expérimentation, les volontaires ont reçu une note d'information. Le contenu de la notice d'information était similaire à celui de la première expérimentation. Elle précisait que la recherche portait sur les liens entre les capacités de jugement temporel et le mouvement, décrivait le déroulement de l'étude, ses objectifs, les modalités de diffusion des résultats, les conditions d'anonymat et de confidentialité, ainsi que les bénéfices et les contraintes d'une éventuelle participation. Les participants ont été informés que les données recueillies restaient confidentielles. La notice était accompagnée d'un formulaire de consentement écrit, signé avant le début de l'expérimentation. Le jour de l'expérimentation, et préalablement au recueil des données, l'investigateur a rappelé au participant qu'il pouvait se retirer de l'étude à tout moment et sans aucune répercussion.

3.2. Expérimentation 1

L'objectif de cette première expérimentation était de pouvoir répondre aux trois premiers objectifs du travail de thèse. Dans ce cadre, plusieurs études ont été menées. L'étude 1 avait pour objectif d'examiner la modulation de la perception temporelle par les mouvements d'atteinte du corps entier (WBR) par rapport à un mouvement simple (doigt). Pour cela, nous nous sommes intéressés spécifiquement à la différence entre une tâche de reproduction temporelle avec un mouvement de WBR par rapport à un mouvement de doigt. L'étude 2 avait pour objectif d'identifier les différentes stratégies motrices entre les mouvements de WBR avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement identique. Nous avons étudié les paramètres cinématiques et les APAs lors du mouvement de WBR dans une condition à vitesse naturelle comparativement à une condition où l'on impose un objectif temporel équivalent à la durée du mouvement effectué à vitesse naturelle. L'étude 3 consistait à analyser les stratégies

motrices lors d'un mouvement de WBR contraint temporellement, selon la durée de l'objectif temporel. De plus, nous souhaitions identifier les stratégies motrices associées à une meilleure capacité de régulation d'un mouvement de WBR contraint temporellement.

3.2.1. Matériel et méthode

3.2.1.1. Participants

Quatorze volontaires âgés de 19 à 34 ans (8 femmes) (âge moyen : 26,4 ± 4,8 ans ; taille moyenne : 172,9 ± 10,6 cm ; poids moyen : 69,6 ± 17,4 kg) ont participé à l'étude. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à la normale, une audition normale, étaient droitiers et n'avaient pas d'antécédents de troubles neurologiques, psychiatriques, moteurs ou perceptifs, ni de blessures aux membres supérieurs ou inférieurs dans les six mois précédant la période d'évaluation. Le protocole expérimental a été approuvé par le Comité d'éthique de la recherche, le Comité d'éthique local de l'Université de Bourgogne Franche-Comté (CERUBFC-2023-03-08-012) et il était conforme aux lignes directrices pertinentes. Tous les participants ont donné leur consentement éclairé par écrit, conformément à la Déclaration d'Helsinki, avant l'expérience, et ont reçu des articles matériels (clé USB, chargeur, casque, clavier sans fil ou souris sans fil) d'une valeur de 20 euros en compensation de leur participation.

Des recherches antérieures examinant la relation entre le mouvement et la perception du temps ont mis en évidence des différences avec une taille d'effet importante. Par exemple, Yokosaka et al. (2015) ont rapporté un effet significatif de la vitesse du mouvement de la main sur les jugements temporels à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées unidirectionnelle ($p < .05$, $\eta^2 = .26$), malgré une taille d'échantillon réduite ($N = 6$). De plus, les études en contrôle moteur portant sur les mouvements de type WBR impliquent généralement des échantillons de 10 à 12 participants (e.g., Casteran et al., 2013; Chiovetto et al., 2010; Fautrelle, Berret, et al.,

2010; Tolambiya et al., 2012). Conformément à ces travaux antérieurs et en supposant une taille d'effet importante, nous avons recruté 14 participants.

3.2.1.2. Dispositif expérimental et procédure

Les participants ont effectué les tâches suivantes dans cet ordre : un mouvement de WBR à vitesse naturelle (WBR-NAT), une tâche de reproduction impliquant un mouvement de WBR avec cinq intervalles cibles (IC) différents (RT-WBR), un mouvement de WBR à vitesse maximale (WBR-Max), et une tâche de reproduction impliquant un mouvement du doigt avec cinq IC différents (RT-Finger).

3.2.1.2.1. Intervalle cible

Les IC consistaient en des intervalles vides marqués par un clic de 3 ms au début (indiquant le début de l'intervalle) et un clic de 3 ms à la fin (indiquant la fin de l'intervalle) (800 Hz, onde carrée), diffusés au moyen d'un casque (Rammsayer & Classen, 1997).

3.2.1.2.2. Mouvement du corps entier

Le mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) a été réalisé conformément aux procédures expérimentales validées dans des études antérieures (Berret et al., 2009 ; Casteran et al., 2013, 2018 ; Chiovetto et al., 2010 ; Pozzo et al., 2002) (voir Figure 8). Les participants devaient utiliser simultanément leurs index pour toucher deux cibles placées devant eux. Ces cibles, mesurant 8 x 4 cm, étaient placées à 0,5 mètre l'une de l'autre (centre à centre) sur une surface en bois, la cible de droite servant de bouton-poussoir. Les cibles étaient placées à des distances correspondant à 30 % de la taille de chaque participant dans les plans antéro-postérieur et vertical, mesurées à partir de l'extrémité distale du gros orteil jusqu'à la base du bouton de la cible. Les participants ont commencé en position debout, leur index droit reposant sur un bouton fixé à la face antérieure de leur cuisse droite, tandis que leurs autres doigts restaient détendus.

3.2.1.2.3. Procédure expérimentale

3.2.1.2.3.1. Mouvement d'atteinte du corps entier à vitesse naturelle (WBR-NAT)

Cette tâche initiale a été conçue pour estimer l'IC individualisé en fonction de la durée du mouvement naturel de chaque participant. Chaque essai consistait à effectuer un mouvement de WBR à vitesse naturelle. Les participants commençaient le mouvement en relâchant le bouton sur leur cuisse avec leur index droit. Ensuite, ils devaient atteindre simultanément deux cibles placées en dessous avec leurs index à une vitesse naturelle, sans contrainte de temps. La cible de droite servait de bouton. Les participants ont effectué 3 blocs de 10 essais, avec des pauses de 2 minutes entre les blocs en position debout pour minimiser l'effet de la fatigue. L'objectif principal de cette tâche était de déterminer un IC de référence individuel, à savoir la durée moyenne (M), correspondant à la durée moyenne du mouvement au cours des essais réalisés dans la condition WBR-NAT.

3.2.1.2.3.2. Tâche de reproduction temporelle avec mouvement du corps entier (RT-WBR)

Pour la tâche de reproduction temporelle, quatre IC supplémentaires ont été calculés sur la base d'une progression géométrique centrée sur la durée moyenne (M), afin de couvrir une gamme de durées plus courtes et plus longues : très courte (VS = x $1{,}2^{-2}$), courte (S = M x $1{,}2^{-1}$), longue (L = M x 1,21 et très longue (VL = M x $1{,}2^{2}$). Ces IC individualisés ont été utilisés dans la tâche de reproduction temporelle avec le mouvement du WBR et le mouvement des doigts.

Chaque essai consistait en la présentation d'un IC suivi d'un intervalle de reproduction (IR). À la fin de l'IC, les participants initiaient l'IR dès qu'ils étaient prêts en relâchant le bouton sur leur cuisse avec leur index droit. Ensuite, ils devaient atteindre simultanément deux cibles

placées en dessous avec leurs index (la cible droite servant de bouton), en essayant de faire correspondre la durée du mouvement d'atteinte (IR) avec l'IC (voir Figure 8). Le fait de relâcher le bouton de la cuisse et d'appuyer sur le bouton de la cible générait des stimuli auditifs (clic de 3 ms, 800 Hz) qui marquaient respectivement le début et la fin de l'IR. Les participants ont reçu l'instruction de ne pas utiliser de stratégies de comptage. Ils ont d'abord effectué un bloc de familiarisation de cinq essais au cours duquel les cinq IC ont été présentés dans un ordre aléatoire. Ensuite, ils ont effectué cinq blocs expérimentaux de 15 essais chacun (un IR par bloc), avec une pause de 2 minutes entre les blocs. Le premier bloc présenté était toujours l'IC moyen, tandis que les autres blocs étaient présentés dans un ordre aléatoire.

3.2.1.2.3.3. Tâche d'atteinte du corps entier à vitesse maximale (WBR-Max)

Lors de chaque essai, les participants ont effectué un mouvement de WBR à vitesse maximale. Les participants ont effectué 10 essais en un seul bloc suivi d'une pause de 2 minutes. Ainsi, nous nous sommes assurés que l'IC le plus court pendant le RT-WBR était supérieur à la durée minimale qu'ils pouvaient produire. L'analyse du modèle linéaire à effets mixtes (LMM) a révélé une durée de mouvement significativement plus courte (β= -254 ms) pour la tâche WBR-Max par rapport à la durée VS de la condition RT-WBR ($p<.001$), ce qui montre que la durée très courte n'a pas été exécutée à la vitesse maximale.

3.2.1.2.3.4. Tâche de reproduction temporelle avec mouvement du doigt (RT-Finger)

Chaque essai consistait en la présentation d'un IC suivi d'un IR. A la fin de l'IC, les participants initiaient l'IR dès qu'ils étaient prêts en appuyant et en relâchant le bouton de la barre d'espacement. Ensuite, ils devaient reproduire le plus fidèlement possible l'IC en appuyant une seconde fois sur la barre d'espacement. L'appui sur la barre d'espacement générait des stimuli auditifs (clic de 3 ms, 800 Hz) qui marquaient le début et la fin de l'IR. Les

participants initiaient eux-mêmes les essais et avaient pour instruction de ne pas utiliser de stratégies de comptage. Ils ont d'abord effectué un bloc de familiarisation de cinq essais, au cours duquel les cinq IC ont été présentés dans un ordre aléatoire. Ensuite, ils ont effectué cinq blocs expérimentaux de 15 essais chacun (un IC par bloc), avec une pause de 2 minutes entre les blocs.

3.2.2. Étude 1 : Des mouvements des doigts aux mouvements du corps entier : comment le type de mouvement influence notre perception du temps

La perception du temps est essentielle pour adapter son comportement dans des environnements dynamiques. Les recherches précédentes ont montré que la perception du temps peut être influencée par le mouvement. Cet effet a été discuté à partir de différents modèles des mécanismes de timing. Selon la TTS (Church, 2003 ; Gibbon et al., 1984), des impulsions sont émises par un oscillateur interne à une certaine fréquence et stockées dans un accumulateur via un commutateur (contrôlé par l'attention), qui se ferme et s'ouvre respectivement au début et à la fin de l'événement à mesurer. Il a été proposé que le mouvement puisse affecter la perception du temps en modulant soit la vitesse du pacemaker, soit le commutateur par le biais d'une modulation attentionnelle (e.g., Kroger-Costa et al., 2013; Sayali et al., 2018). Ces modèles se concentrent principalement sur les mécanismes d'horloge interne et ne prennent pas explicitement en compte le rôle des indices sensorimoteurs externes dans le comportement temporel (De Kock, Gladhill, et al., 2021). Le cadre de la CBI traite explicitement de ces interactions sensorimotrices, en proposant que les actions motrices offrent des indices temporels supplémentaires qui sont intégrés de manière optimale aux signaux sensoriels, ce qui pourrait expliquer les effets du mouvement sur les performances temporelles (voir la revue de De Kock, Gladhill, et al., 2021).

Dans l'ensemble, le soutien empirique en faveur des modèles précédemment décrits provient principalement d'études portant sur des mouvements discrets et mono-articulaires, tels

que le tapotement de doigt ou l'appui sur un bouton, ou de mouvement n'impliquant pas le corps entier. En revanche, les mouvements du corps entier, tels que les mouvements de WBR (e.g., ramasser un objet au sol), plus représentatifs des situations quotidiennes, ont reçu relativement peu d'attention (De Kock, Gladhill, et al., 2021 ; Fautrelle et al., 2015 ; Gavazzi et al., 2013). La présente étude visait à approfondir cette question en comparant la performance temporelle entre les mouvements de WBR et les mouvements du doigt (objectif 1 de la thèse). Afin de répondre à l'objectif 1, à savoir examiner la modulation de la perception du temps par les mouvements de WBR comparativement aux mouvements du doigt, nous analyserons exclusivement la tâche de reproduction temporelle de l'expérimentation 1 réalisée dans ces deux conditions (RT-WBR et RT-Finger).

Étant donné les résultats antérieurs démontrant que le mouvement module la performance temporelle, nous avons évalué les prédictions dérivées de chacun des modèles précédemment décrits. Selon la TTS et l'hypothèse selon laquelle le mouvement augmente la vitesse du pacemaker, nous avons formulé l'hypothèse d'une réduction de la variabilité temporelle et d'une sous-reproduction de chaque IC lors des mouvements de WBR comparés aux mouvements de doigt (Kroger-Costa et al., 2013 ; Sayali et al., 2018). En se basant sur la TTS et sur la suggestion que le mouvement puisse moduler l'attention, nous avons prédit que les mouvements de WBR entreraient en compétition pour les ressources attentionnelles lors de la phase de reproduction, conduisant à une diminution du nombre d'impulsions accumulées et, par conséquent, à une sur-reproduction, quel que soit l'IC, comparativement aux mouvements de doigt (Kroger-Costa et al., 2013). En accord avec le cadre de la CBI, nous avons émis l'hypothèse que les mouvements de WBR fourniraient un canal temporel supplémentaire, réduisant ainsi la variabilité dans la reproduction des intervalles temporels.

À la date de soumission du présent manuscrit de thèse, cette étude a été acceptée pour publication dans la revue Psychological Research (voir Annexe 1).

3.2.2.1. Collecte et traitement des données

Nous avons utilisé E-Prime pour délivrer les stimuli, présenter les IC et collecter les IR. Tous les traitements des données de performance temporelle ont été effectués à l'aide de scripts personnalisés écrits en Python dans l'environnement Jupyter Notebook (version 7.3.2., Python 3).

L'un des participants a été exclu de l'analyse pour cette étude en raison de performances incohérentes dans la tâche de reproduction temporelle dans la condition « doigt » (13 essais (17%) étaient aberrants ; après élimination, le coefficient de variation était supérieur de 4,96 SD à celui des treize autres participants).

3.2.2.1.1. Temps de mouvement et intervalle de reproduction

Pour les tâches WBR-NAT, RT-WBR et WBR-Max, la durée du mouvement a été calculée pour chaque essai, comme étant la durée (en millisecondes) entre le relâchement du bouton de la cuisse et l'appui sur le bouton de la cible. Les essais dans lesquels des erreurs se sont produites en raison de problèmes techniques lors de l'acquisition du RT-WBR ont été exclus (20 essais - 2 %). Pour la tâche RT-Finger, l'IR a été calculé pour chaque essai comme la durée (en millisecondes) entre la première et la deuxième pression sur la touche espace.

3.2.2.1.2. Précision temporelle

Pour évaluer la précision temporelle des participants dans la reproduction de l'IC, nous avons calculé pour chaque essai de chaque durée et mouvement, le ratio IR/IC, avec la formule suivante (Monfort et al., 2014) :

$$ratio\ IR/IC = \frac{IR}{IC}$$

Équation 1 : Ratio IR/IC

3.2.2.1.3. Variabilité temporelle

Le coefficient de variation (CV) a été calculé à l'aide de la formule ci-dessous. Étant donné que le CV ne peut pas être calculé sur des essais uniques, et afin d'utiliser un modèle LMM, le CV a été calculé pour chaque mouvement, durée et participant sur 5 essais consécutifs (Monfort et al., 2022). Cet indice de variabilité temporelle capture une propriété clé du timing selon laquelle, conformément à la loi de Weber, la variabilité devrait augmenter proportionnellement à l'ampleur de l'IC, de sorte que le CV reste approximativement constant à travers différentes durées (e.g., Piras & Coull, 2011).

$$CV = \frac{Ecart\ type\ de\ RI}{Moyenne\ de\ RI}$$

Équation 2 : Coefficient de variation

3.2.2.2. Analyses statistiques

Nous avons utilisé un LMM pour quantifier les différences dans le ratio IR/IC et le CV en fonction du Mouvement (« Doigt » vs « WBR »), de la Durée (« Très courte », « Courte », « Moyenne », « Longue », « Très longue ») et de leur interaction (Mouvement x Durée). Les termes du modèle ont été imbriqués selon la méthode de Satterthwaite. Les effets fixes ont été codés en variable « simple » (*simple coding* en anglais). Les participants ont été inclus en tant qu'effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine (De Kock et al., 2023; Monfort et al., 2022). Lorsqu'une interaction significative a été trouvée, des analyses d'effets simples ont été effectuées.

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide de JAMOVI 2.6.26 (The jamovi project, 2025) [Logiciel informatique]. Consulté sur https://www.jamovi.org. Les LMM ont été réalisés avec le GAMLj3 : General analyses for linear models version 3 (module jamovi, récupéré sur https://gamlj.github.io/). Chaque fois qu'un effet fixe significatif a été trouvé, une

taille d'effet de type d *(d-like* en anglais*)* a été calculée avec le coefficient de régression non normalisé divisé par l'écart-type résiduel (Rouder et al., 2012) :

$$d = \frac{\text{coefficient de régression non normalisé}}{\text{écart type résiduel}}$$

Equation 3 : Taille d'effet de type d (d-like en anglais)

3.2.2.3. Résultats

L'analyse descriptive de la précision temporelle est résumée dans le Tableau 1 et illustrée dans la Figure 10A. L'analyse LMM a révélé un effet principal significatif de la Durée sur le ratio IR/IC ($p < .001$). Par rapport à la durée très courte, le ratio IR/IC a diminué de manière significative pour les durées moyenne, longue et très longue (Moyenne - Très courte : $\beta = -0,07$, $p < .001$, $d = -5,13$; Longue - Très courte : $\beta = -.07$, $p < .001$, $d = -5.29$; Très longue - Très courte : $\beta = -.7$, $p < .001$, $d = -5.55$), mais pas pour la durée courte (Courte - Très courte : $\beta = -.01$, $p = .122$). Il y avait également un effet principal significatif du Mouvement sur le ratio IR/IC (RT-WBR - RT-Finger : $\beta = -.02$, $p < .001$, $d = -1.83$). De plus, l'interaction Durée × Mouvement était significative ($p < .001$), indiquant que l'effet du type de mouvement variait selon les durées. Les analyses des effets simples de cette interaction ont révélé que, pour les très courtes durées, le ratio IR/IC est significativement plus élevé pour le RT-WBR que pour le RT-Finger ($F(1,1908) = 17.20$, $p < .001$). Nous n'avons pas observé de différences significatives entre RT-WBR et RT-Finger pour les courtes durées ($F(1, 1908) = 1.74$, $p = .187$). En revanche, pour les durées moyenne, longue et très longue, le ratio IR/IC était significativement plus faible pour RT-WBR que pour RT-Finger (moyenne : $F(1, 1908) = 20.35$, $p < .001$; longue : $F(1, 1908) = 35.31$, $p < .001$; très longue : $F(1, 1908) = 28.23$, $p < .001$). De plus, l'analyse *post hoc* de cette interaction a révélé des différences significatives entre les IC uniquement pour le RT-WBR, mais pas pour le RT-Finger (toutes les comparaisons *post hoc* ne sont pas significatives).

Pour les mouvements de WBR, le ratio IR/IC était significativement plus élevé pour les durées très courtes et courtes que pour les durées moyennes, longues et très longues (très courte - courte : $p = .204$; très courte - moyenne : $p < .001$; très court - long : $p < .001$; très courte - très longue : $p < .001$; courte - moyenne : $p < .001$; courte - longue : $p < .001$; courte - très longue : $p < .001$).

Pour tenir compte des variations linéaires potentielles de l'IR/IC au cours des essais, nous avons effectué une analyse complémentaire incluant l'essai comme covariable. Cette analyse a révélé un effet principal significatif de l'essai ($\beta = .002$, $p < .001$, $d = .13$) ainsi qu'une interaction significative Mouvement × Essai ($\beta = -.006$, $p < .001$, $d = -.35$). L'analyse des effets simples de cette interaction a montré que le ratio IR/IC augmentait significativement au fil des essais pour le RT-Finger ($F(1,2034) = 31,51$, $p < .001$), mais restait stable pour le RT-WBR ($F(1,2034) = .61$, $p = .434$).

	Durée	Mouvement	Moyenne ± Erreur standard (SE)	95% Intervalle de confiance	
				Inférieure	Supérieure
Ratio IR/IC	Très courte	Doigt	1.047 ± 0.011	1.026	1.067
		WBR	1.095 ± 0.008	1.078	1.111
	Courte	Doigt	1.05 ± 0.011	1.029	1.071
		WBR	1.066 ± 0.009	1.049	1.083
	Moyenne	Doigt	1.03 ± 0.009	1.012	1.049
		WBR	0.978 ± 0.008	0.963	0.993
	Longue	Doigt	1.036 ± 0.010	1.017	1.056
		WBR	0.968 ± 0.007	0.954	0.981
	Très longue	Doigt	1.03 ± 0.010	1.009	1.05
		WBR	0.969 ± 0.008	0.953	0.984

Tableau 1 : Analyse descriptive de la précision et variabilité temporelle en fonction de la durée et du mouvement

Le ratio IR/IC moyen (ratio IR/IC ± SE) avec des intervalles de confiance à 95 % pour chaque durée et chaque type de mouvement (mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) et doigt).

L'analyse descriptive de la variabilité temporelle est illustrée à la Figure 10B. L'analyse LMM a révélé un effet principal significatif du mouvement sur le CV (RT-WBR – RT-Finger : β = -.012, p = .002, d = -8.4), indiquant que la variabilité temporelle était plus faible dans la condition RT-WBR (moyenne = .068, SE = .003, IC à 95 % [.062, .073]) que dans la condition RT-Finger (moyenne = .081, SE = .002, IC à 95 % [.074, .087]). En revanche, il n'y avait pas d'effet principal significatif de la Durée (p = .245) ni d'interaction significative Mouvement × Durée (p = .288).

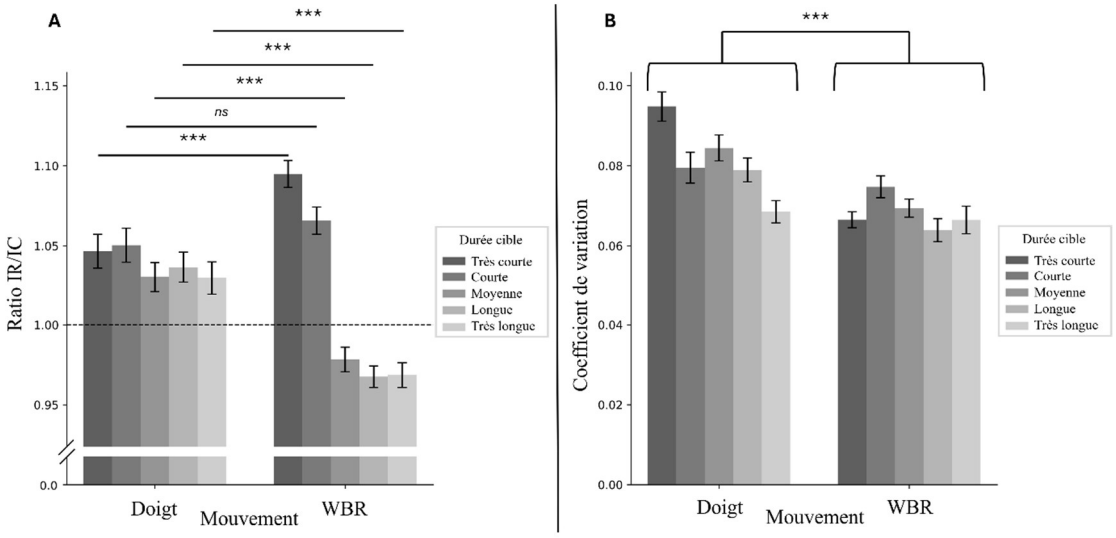


Figure 10 : Précision temporelle et variabilité entre les durées et les mouvements.
***A** Visualisation de la précision temporelle moyenne (ratio IR/IC ± SE) pour chaque mouvement (Whole-Body Reaching (WBR) vs. Finger) et durée (Very short to Very long) pendant la tâche de reproduction.* ***B** Visualisation de la variabilité temporelle moyenne (coefficient de variation ± SE) pour chaque mouvement et durée pendant la tâche de reproduction. La signification statistique est indiquée comme suit : ns = non significatif ; *** p < .001.*

3.2.2.4. Discussion

L'objectif principal de ce travail était d'examiner comment les mouvements du WBR, par rapport aux mouvements des doigts, influencent (i) la variabilité temporelle et (ii) la

précision temporelle dans une tâche de reproduction temporelle. Nous avons constaté que la variabilité temporelle était significativement plus faible pour les mouvements du WBR que dans les mouvements des doigts. En ce qui concerne la précision temporelle, nous avons constaté que les intervalles de temps étaient globalement sur-reproduits avec les mouvements des doigts par rapport aux mouvements du WBR. De plus, nous avons observé une sur-reproduction pour les mouvements du WBR par rapport aux mouvements du doigt pour des durées très courtes, tandis que nous avons constaté l'effet inverse pour des durées moyennes et longues. En outre, lorsque l'on examine la condition WBR, on constate que l'IC très court (correspondant à des mouvements plus rapides) était associé à une sur-reproduction par rapport aux autres IC.

3.2.2.4.1. Variabilité temporelle

La diminution de la variabilité observée pour les mouvements de WBR est cohérente avec des données récentes suggérant que les mouvements continus améliorent la précision temporelle par rapport aux mouvements discrets ou à l'absence de mouvement (De Kock et al., 2023; Wiener et al., 2019). Cet effet s'aligne également avec les prédictions issues de la CBI sensoriels (Alais & Burr, 2019; De Kock et al., 2021, 2023). Selon ce cadre, plusieurs sources d'information temporelle sont combinées en fonction de leur fiabilité, ce qui permet d'obtenir des estimations plus précises que celles issues d'une seule source (Alais & Burr, 2019; Ma et al., 2006; Seilheimer et al., 2014). Comme l'ont discuté De Kock et al. (2023), les estimations temporelles convergent vers la modalité présentant la plus faible variance, et le mouvement pourrait offrir des informations égales ou supérieures à celles d'autres modalités sensorielles. Leur étude a montré que l'intégration des canaux auditifs et sensorimoteurs pendant la phase d'encodage d'une tâche de reproduction temporelle améliorait la précision par rapport à chaque modalité prise isolément (De Kock et al., 2023). De manière similaire, nos résultats suggèrent que les mouvements de WBR durant la phase de décodage pourraient fournir des indices sensorimoteurs plus fiables que les mouvements discrets du doigt, réduisant ainsi la variabilité

temporelle globale. De manière intéressante, ces résultats sont valides même dans des conditions avec des intervalles vides, contredisant ainsi des études antérieures suggérant que la combinaison bayésienne d'indices serait moins robuste avec des intervalles vides qu'avec des intervalles remplis (Hartcher-O'Brien et al., 2014; Iwasaki et al., 2019). La réduction de la variabilité temporelle observée lors des mouvements de WBR est également cohérente avec notre prédiction et hypothèse selon laquelle le mouvement accélère l'accumulateur au sein de la TTS, réduisant ainsi la variabilité temporelle (Balci et al., 2008; Sayali et al., 2018).

3.2.2.4.2. Précision temporelle

La sur-reproduction temporelle globale observée pour les mouvements des doigts par rapport aux mouvements de WBR contredit la prédiction selon laquelle les mouvements de WBR entreraient en concurrence avec les ressources attentionnelles allouées au temps pendant la phase de reproduction, entraînant ainsi une réduction du nombre d'impulsions accumulées. Au contraire, ces résultats indiquent une augmentation de l'attention temporelle pendant les mouvements de WBR. Des travaux antérieurs ont montré qu'une attention accrue à un stimulus temporel tend à dilater la durée perçue (Mattes & Ulrich, 1998; Tse et al., 2004), tandis qu'un déficit d'attention tend à comprimer la durée perçue et à réduire la précision temporelle (Cicchini & Morrone, 2009; Grondin, 2010; Hass et al., 2012). Notre observation de sur-reproduction (i.e. sous-estimation) associée à une variabilité temporelle accrue pour RT-Finger suggère que les participants ont consacré moins de ressources attentionnelles au traitement temporel lorsqu'ils effectuaient la tâche de reproduction avec des mouvements des doigts qu'avec des mouvements de WBR. Cependant, cette observation pourrait également correspondre à notre hypothèse selon laquelle les mouvements de WBR accélèrent l'accumulateur. Une analyse complémentaire du ratio IR/IC sur l'ensemble des essais a révélé que, dans chaque bloc de durée, le ratio IR/IC augmentait de manière linéaire avec les essais pour RT-Finger, mais pas pour RT-WBR. Cette dérive essai par essai du ratio IR/IC (i.e.,

conduisant à une sur-reproduction) observée uniquement dans RT-Finger, et sur toutes les durées, soutient l'hypothèse d'une allocation fluctuante de l'attention au cours de chaque bloc. Néanmoins, ni l'hypothèse d'une attention temporelle accrue due aux mouvements de WBR, ni l'explication de la dérive attentionnelle observée pour les mouvements des doigts ne peuvent expliquer l'effet inverse observé dans les mouvements de WBR à des durées plus courtes (surproduction) et à des durées moyennes et plus longues (sous-production).

Le ratio IR/IC diminue globalement avec l'augmentation de la durée, ce qui rappelle un effet de tendance centrale (Vierordt, 1868), bien que notre protocole (i.e., répétition d'une même durée cible au sein d'un bloc) ne favorise pas directement cet effet. L'analyse de l'interaction montre que cet effet n'était observable que dans la condition RT-WBR. Plus précisément, le ratio IR/IC était significativement plus faible pour RT-WBR aux durées moyennes et longues, mais plus élevé pour les très courtes durées.

Une explication possible de cette tendance dans RT-WBR repose sur l'influence de paramètres liés au mouvement, tels que la direction, la vitesse, la distance ou le contexte sur la perception du temps (De Kock et al., 2023; Tomassini & Morrone, 2016; Yokosaka et al., 2015; Yon et al., 2017). Par exemple, Yokosaka et al. (2015) ont montré que des mouvements rapides de la main compriment les intervalles visuels perçus, conduisant à une sous-estimation du temps écoulé. Dans notre tâche, des vitesses élevées requises pour exécuter les durées très courtes dans la condition WBR pourraient avoir comprimé la durée subjective, entraînant une surestimation. Le mécanisme sous-jacent responsable d'une telle compression nécessiterait toutefois des recherches supplémentaires.

Alternativement, la sur-reproduction observée pourrait résulter d'une contrainte motrice, à savoir le compromis vitesse-précision dans les mouvements rapides, comme décrit par Schmidt et al. (1979). Ils postulent que pour une taille cible et une amplitude de mouvement identiques, une durée de mouvement plus courte (i.e., vitesse plus élevée) augmente la difficulté de la tâche

en raison des limites biomécaniques et d'une dynamique de mouvement plus élevée. Dans cette perspective, les participants peuvent privilégier la précision spatiale à la précision temporelle lorsque les exigences biomécaniques s'intensifient, car les erreurs spatiales entraînent un échec complet de la tâche, tandis que les erreurs temporelles ne compromettent que partiellement la performance. Cela est cohérent à notre adaptation individualisée des IC en fonction du mouvement naturel du WBR (WBR-NAT) de chaque participant, dans laquelle les durées moyennes étaient intrinsèquement perçues comme biomécaniquement naturelles, et les durées plus courtes comme plus difficiles sur ce plan. On pourrait émettre l'hypothèse que le fait de privilégier la précision spatiale à des vitesses plus élevées entraînerait une variabilité temporelle accrue, ce que nous n'avons pas observé dans nos résultats. Cela suggère une interaction plus complexe dans laquelle les contraintes biomécaniques pourraient principalement influencer la précision temporelle en modulant l'objectif temporel vers une durée plus proche de la vitesse naturelle du mouvement, sans affecter directement la précision temporelle ou ses mécanismes sous-jacents (e.g., le cadre de la CBI ou TTS). Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour clarifier l'interaction entre les contraintes biomécaniques et les performances temporelles dans les mouvements de WBR.

3.2.2.4.3. Limites et perspectives

Malgré les résultats apportés par notre étude, certaines limites doivent être soulignées. Notre paradigme comparait des mouvements de WBR et des mouvements du doigt qui différaient en amplitude, en vitesse et en type de mouvement (WBR vs doigt). En outre, les mouvements de WBR exigeaient une exécution bimanuelle (main droite pour la réponse, main gauche pour la stabilisation), tandis que la reproduction avec des mouvements du doigt était uni-manuelle. Des travaux antérieurs ont montré qu'une tâche de timing bimanuelle conduit généralement à une réduction de la variabilité par rapport aux tâches de timing uni-manuelle, phénomène expliqué soit par l'existence de multiples timers internes, soit par la présence de

sources multiples de rétroaction sensorielle (Drewing et al., 2002; Helmuth & Ivry, 1996; Ivry & Richardson, 2002). Cette distinction a donc pu contribuer aux différences de performance observées. Toutefois, l'usage d'un WBR bimanuelle était nécessaire pour garantir la fiabilité des mouvements de WBR et s'inscrit dans la lignée d'études antérieures (e.g., Casteran et al., 2013, 2018). Des plans expérimentaux supplémentaires manipulant systématiquement ces facteurs seraient souhaitables dans de futures études (De Kock, Gladhill, et al., 2021). Par exemple, en mettant en œuvre une comparaison graduée entre types de mouvements (e.g., doigt, atteinte du bras, flexion du tronc et WBR). Il serait également pertinent de manipuler des paramètres de mouvement individuels (e.g., direction, amplitude, bi-/uni-manuelle) au sein de chaque type de mouvement (e.g., WBR) afin d'évaluer leurs contributions respectives à la performance temporelle.

Étant donné l'interdépendance entre vitesse, type de mouvement, durée et distance, et leur influence potentielle sur les estimations temporelles, de futures études devraient envisager des durées standardisées ou individualisées, accompagnées d'une mesure ou d'un contrôle explicite des vitesses naturelles et maximales des participants. Cela permettrait de déterminer si les effets de surestimation sont principalement dus à des contraintes biomécaniques ou à d'autres facteurs perceptifs et attentionnels. En outre, étant donné que la vitesse naturelle des mouvements peut différer entre les mouvements du doigt et les mouvements de WBR, il serait pertinent de contrôler séparément ces conditions. Par exemple, dans les tâches de tapping du doigt, les mouvements rythmiques confortables se situent généralement autour de 600 ms (Repp, 2005), tandis que dans notre étude, la durée moyenne des mouvements de WBR à vitesse naturelle (i.e. correspondant à l'intervalle cible moyen) était de 828 ± 214 ms.

Bien que les interprétations proposées ici, en lien avec la TTS, la CBI, et les effets de tendance centrale, constituent des cadres explicatifs plausibles, elles demeurent, à ce stade, spéculatives. Le présent protocole ne permet pas de dissocier directement ces mécanismes. Des

recherches futures pourraient être orientées vers la validation expérimentale de ces hypothèses. Par exemple, des paradigmes de double tâche impliquant des tâches non temporelles distinctes pourraient être utilisés pour quantifier la charge cognitive et son influence sur l'estimation temporelle (Molet et al., 2011). Il serait également possible d'utiliser des mesures directes de l'attention, telles que l'eye-tracking (Ogden et al., 2021) ou l'électroencéphalographie (Kaushik et al., 2022).

3.2.2.5. Conclusion

La présente étude montre que les mouvements de WBR réduisent la variabilité temporelle par rapport aux mouvements du doigt. Cette amélioration peut s'expliquer par le CBI et par l'hypothèse selon laquelle les mouvements de WBR accélèrent l'accumulateur au sein de la TTS. S'agissant de la précision temporelle, nous avons observé une compression globale du temps (i.e., une sur-reproduction) dans la condition RT-Finger par rapport à RT-WBR. Ce résultat corrobore l'hypothèse d'une accélération de l'accumulateur lors des mouvements de WBR, mais il pourrait également refléter des fluctuations de l'allocation attentionnelle lors des mouvements du doigt. De plus, la condition RT-WBR a montré une sur-reproduction pour les courtes durées par rapport aux durées moyennes et longues, ce qui peut s'expliquer soit par une vitesse de mouvement plus élevée comprimant le temps perçu, soit par des contraintes biomécaniques. Ces résultats présentent un intérêt théorique important, car les mouvements du corps entier sont encore peu explorés dans le champ de la perception du temps (De Kock et al., 2021). Nos données prolongent les modèles classiques en montrant que l'exécution motrice ne constitue pas seulement une sortie terminale, mais peut façonner les performances temporelles de manière modulée par des paramètres connus (e.g., amplitude, direction), mais aussi par la vitesse et le type de mouvement utilisé.

Le fait que les mouvements de WBR puissent améliorer la précision temporelle sans compromettre la précision pour les durées moyennes et longues a également des implications cliniques. Étant donné que des indices temporels améliorent la rythmicité de la marche chez des patients atteints de la MP ou d'AVC (Bella et al., 2017; Benoit et al., 2014; Schneider et al., 2010), et compte tenu de l'usage fréquent des mouvements du corps entier en rééducation, de futures interventions pourraient intégrer des tâches complexes de mouvement et de timing dans les programmes de réhabilitation afin d'optimiser les résultats à la fois moteurs et temporels chez les populations souffrant de troubles du mouvement ou du timing.

3.2.3. Étude 2 : Se déplacer à temps : objectifs temporels dans les mouvements d'atteintes du corps entier

Dans la première étude, nous avons observé que le mouvement de WBR module la perception du temps par rapport à un mouvement de doigt. Dans la présente étude nous nous intéressons dorénavant à l'intégration du timing explicite au sein du contrôle moteur. En effet, un aspect fondamental du comportement est que les organismes mobiles doivent être capables de déterminer avec précision où et quand se déplacer (Rosenbaum, 2009). Alors que les indices temporels sont essentiels pour coordonner les segments corporels lors du mouvement et interagir avec l'environnement (Todorov, 2004), la recherche s'est principalement concentrée sur la précision spatiale, en particulier dans le cas des mouvements rapides, des segments isolés et des tâches de WBR (Gaveau et al., 2014; Gomi, 2008; Hilt et al., 2016, 2018; Paillard, 1996). Par exemple, les travaux de Berret et al. (2009) et de Thomas et al. (2005) montrent que les mouvements de WBR sont organisés selon une structure de coordination et de covariation angulaire permettant d'assurer simultanément le maintien de l'équilibre et l'atteinte de la cible par le membre focal (tronc, bras et main). Ces paradigmes ont fourni des informations importantes sur les phases de préparation et d'exécution des mouvements vers une cible spatiale (Hilt et al., 2016; Shadmehr et al., 2010), et divers cadres théoriques ont été développés pour

expliquer les mouvements d'atteinte, notamment la théorie de la programmation motrice (Desmurget & Grafton, 2000). En revanche, la place de l'objectif temporel reste relativement peu étudiée (e.g., Thomas et al., 2019), bien que plusieurs travaux aient examiné ces aspects temporels par les variations de durée de mouvement dans le cas du WBR (Casteran et al., 2013; Fautrelle et al., 2015; Hudson et al., 2008). Par exemple, Casteran et al. (2013) ont montré que l'organisation spatio-temporelle d'un mouvement de WBR (e.g., covariation angulaire, vitesse du CoM) s'adapte en fonction de la durée du mouvement et que cette adaptation ne résulte pas simplement d'un redimensionnement temporel des signaux moteurs. Néanmoins, peu d'études ont explicitement investigué un objectif temporel conjointement à un objectif spatial dans les mouvements d'atteinte. Esposti et al. (2015) soulignent que, bien que la relation entre les APAs et la vitesse soit bien documentée, en particulier la dépendance de la latence des APAs vis-à-vis de la vitesse du mouvement (Horak et al., 1984; Lee et al., 1987; Shiratori & Aruin, 2007), la question de savoir si le facteur déterminant cette variation de latence provient de la vitesse intentionnelle ou réelle du mouvement reste débattue. Leurs résultats apportent des preuves solides que la vitesse intentionnelle (i.e., l'objectif temporel) joue un rôle déterminant dans la modulation temporelle des APAs, plutôt que la vitesse réelle du mouvement, suggérant que les objectifs temporels sont intégrés dès les premières étapes de la préparation motrice. Cette observation soulève l'hypothèse selon laquelle l'exécution du mouvement varie également en fonction de l'objectif temporel et nécessite d'intégrer cet aspect dans les modèles actuels du contrôle moteur aux côtés des objectifs spatiaux.

Dans ce cadre, la présente étude répond à l'objectif 2 de la thèse, visant à étudier l'organisation motrice entre le WBR à vitesse naturelle et le WBR contraint temporellement pour une durée de mouvement équivalente. Autrement dit, nous souhaitons déterminer comment l'objectif temporel explicite module la préparation et l'exécution du mouvement. Plus précisément, nous cherchons à savoir si les APAs diffèrent systématiquement selon la condition

temporelle. Deuxièmement, nous souhaitons déterminer si la cinématique du mouvement (e.g., vitesse du CoM, élévation angulaire) varie en fonction de l'objectif temporel imposé. Nous faisons l'hypothèse qu'un objectif temporel explicite modifie à la fois les APAs et les stratégies cinématiques, apportant ainsi de nouvelles perspectives sur la manière dont le système moteur intègre simultanément les contraintes temporelles et spatiales lors des mouvements de WBR. Pour ce faire, nous considérerons uniquement la tâche de reproduction temporelle de l'expérimentation 1, avec un mouvement de WBR pour une durée moyenne (WBR-Temp) et la tâche de WBR à vitesse naturelle (WBR-NAT).

3.2.3.1. Collecte des données

Les données EMG n'ont été recueillies que chez 6 participants (âge moyen : 27,3 ± 4,2 ans ; taille moyenne : 170,2 ± 10,2 cm ; poids moyen : 64,5 ± 12,2 kg), en raison d'un problème technique et de l'indisponibilité du matériel. Les enregistrements EMG ont été effectués à l'aide d'un système de surface sans fil (Biopac Dual Wireless EMG BioNomadix Pair), avec une fréquence d'échantillonnage de 2 kHz. Huit muscles différents du côté droit du corps de chaque sujet ont été enregistrés simultanément : tibial antérieur, gastrocnémien médial, biceps fémoral, vaste médial du quadriceps, deltoïde antérieur, deltoïde postérieur, biceps brachial et triceps brachial (voir Figure 11B). Pour l'ensemble des muscles, les électrodes autocollantes jetables ont été positionnées de manière à minimiser les erreurs de mesure dues aux contractions des muscles adjacents, selon les recommandations d'Ivanenko et al. (2005) et les directives du SENIAM (www.seniam.org). Avant la pose des électrodes de surface (avec un intervalle de 2 cm entre chaque électrode pour un muscle enregistré, et les électrodes de référence placées respectivement sur la malléole médiale, la patella, l'olécrane et la clavicule), lorsque cela était nécessaire, la peau a été rasée et nettoyée à l'alcool afin d'assurer une faible résistance. Une fois les électrodes en place, le rôle fonctionnel de chaque muscle et la justesse du placement

des électrodes ont été vérifiés en demandant aux participants d'effectuer des contractions isométriques et libres (Kendall et al., 2005).

Les données cinématiques ont été recueillies chez les 14 participants à l'aide d'un système optoélectronique (Qualisys, fréquence d'échantillonnage : 240 Hz) avec huit caméras permettant de capturer la cinématique du mouvement en trois dimensions (3D). Onze marqueurs rétro-réfléchissants (2 cm de diamètre) ont été placés sur des repères anatomiques du côté droit du corps (canthus externe de l'œil, méat auditif, acromion, condyle huméral, processus styloïde ulnaire, extrémité de l'index, vertèbre L5, grand trochanter, interligne articulaire du genou, malléole externe, tête du cinquième métatarsien du pied) (voir Figure 11A). Un modèle biomécanique à neuf segments, similaire à ceux utilisés dans des travaux antérieurs (e.g., Berret et al., 2009; Casteran et al., 2013b; Chiovetto et al., 2010), a été employé (Figure 12).

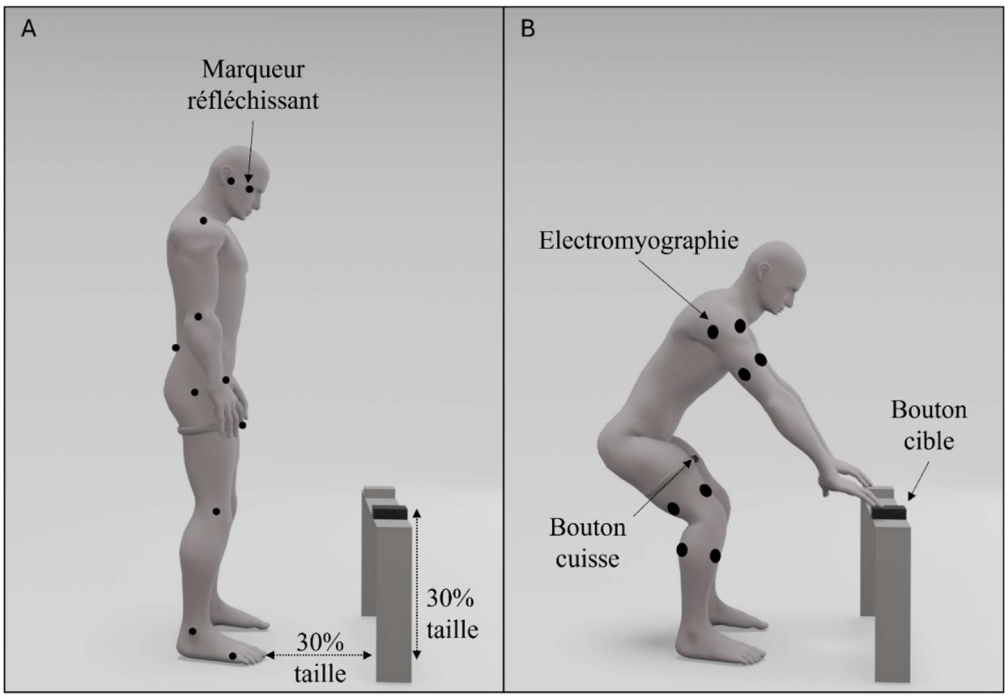


Figure 11 : Mouvement d'atteinte du corps entier

A) Représentation de la position initiale lors du mouvement d'atteinte du corps entier vers une cible positionnée à 30 % sur l'axe antéro-postérieur et sur l'axe vertical. Les marqueurs

réfléchissants sont représentés par des cercles noirs pleins. B) Représentations de la position finale lors du même mouvement vers une cible positionnée à 30 % sur l'axe antéro-postérieur et sur l'axe vertical, du bouton fixé sur la cuisse et du bouton-cible. Les emplacements approximatifs des électrodes électromyographiques sont indiqués en noir.

3.2.3.2. Traitement des données

Tous les traitements des données ont été réalisés à l'aide d'un script personnalisé en Python dans l'environnement Jupyter Notebook 7.2.2 (Python 3).

3.2.3.2.1. Durée du mouvement

Pour les conditions WBR-NAT et WBR-Temp, la durée du mouvement pour chaque essai a été calculée en millisecondes comme l'intervalle de temps entre le relâchement du bouton fixé à la cuisse et l'appui sur le bouton-cible. Les essais comportant des erreurs (i.e., des problèmes techniques) ont été exclus (moyenne = 4.5 essais par participant ; n = 69 essais). Nous avons calculé le coefficient de variation de la durée du mouvement (CVmoteur) pour chaque participant et pour chaque condition.

3.2.3.2.2. Ajustements posturaux anticipés

Tous les signaux EMG ont été filtrés à l'aide d'un filtre passe-bas de Butterworth du second ordre à 100 Hz, puis les signaux ont été rectifiés (Callegari et al., 2018). Le moment Tzéro a été défini comme l'instant où le participant relâchait le bouton fixé à la cuisse, marquant ainsi le début du mouvement.

Pour quantifier les changements anticipatoires de l'activité musculaire ($\int EMG(APA)$) précédant le mouvement, les signaux EMG ont d'abord été intégrés dans l'intervalle de -150 à 0 ms par rapport à Tzéro ($\int EMG(150)$), puis soustraits de l'activité de base définie comme

l'intégrale de -800 à -650 ms par rapport à Tzéro ($\int EMG(baseline)$). La normalisation a été effectuée en divisant cette différence par l'activité de base (Berg & Strang, 2012 ; Strang & Berg, 2007) :

$$\int EMG(APA) = \frac{\left(\int EMG(150) - \int EMG(baseline)\right)}{\int EMG(baseline)}$$

Équation 4 : Normalisation de l'amplitude des ajustements posturaux anticipés

La latence musculaire a été détectée dans une fenêtre temporelle allant de -450 ms à +200 ms par rapport à Tzéro (Callegari et al., 2018), par une détection automatique à l'aide d'un algorithme personnalisé. La latence d'un muscle spécifique a été définie comme l'instant (d'une durée minimale de 50 ms) où son amplitude EMG dépassait (activation) ou était inférieure (désactivation) à la moyenne plus deux écarts-types de son activité de base (Aruin & Shiratori, 2003 ; Callegari et al., 2018).

3.2.3.2.3. Cinématique du mouvement

Avant traitement, les positions des marqueurs ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas de Butterworth du cinquième ordre (filtfilt), avec une fréquence de coupure de 7,5 Hz (Berret et al., 2009). Le début du mouvement a été défini comme l'instant où le participant relâchait le bouton fixé à la cuisse. Les paramètres cinématiques, y compris la vitesse du doigt en 3D et les paramètres angulaires, ont été calculés selon des techniques déjà décrites (Papaxanthis et al., 2005 ; Berret et al., 2009 ; Casteran et al., 2013, 2018).

Huit angles d'élévation (angle entre la verticale et le segment corporel) ont été calculés : jambe (Sk), cuisse (Th), pelvis (Pe), tronc (Tr), humérus (Hu), avant-bras (Fo), main (Ha) et tête (He) (voir Figure 12B). Le déplacement du CoM en 3D a également été estimé (voir Figure 12A– ligne verte), à l'aide d'un modèle mathématique rigide à huit segments (tête, tronc, cuisse, jambe, pied, bras, avant-bras, main), en utilisant les paramètres anthropométriques définis par

Winter (2009) et validés par Stapley et al. (1999) et Berret et al. (2009) dans des études antérieures sur les mouvements corporels globaux (Casteran et al., 2013, 2018).

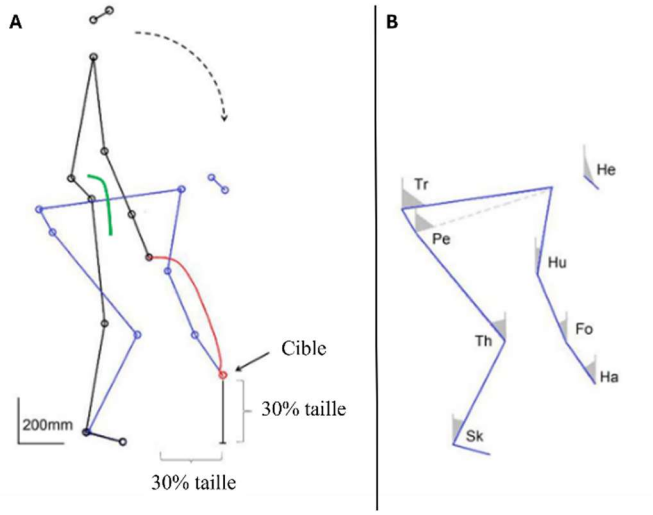


Figure 12 : Schémas cinématiques du mouvement d'atteinte du corps entier

Schémas cinématiques du mouvement d'atteinte du corps entier vers une cible positionnée à 30 % de l'axe antéropostérieur et sur l'axe vertical. Le déplacement du marqueur du doigt est en rouge, celui du CoM en vert. Les angles d'élévation calculés pour les mouvements incluent la jambe (Sk), cuisse (Th), pelvis (Pe), tronc (Tr), tête (He), humérus (Hu), avant-bras (Fo) et main (Ha). Figure adaptée de Casteran et al. (2013).

Nous avons analysé la cinématique 3D du doigt et du CoM en extrayant les paramètres suivants : vitesse maximale, vitesse moyenne, temps relatif jusqu'à la vitesse maximale, et nombre de pics de vitesse. L'amplitude angulaire des huit angles d'élévation a été mesurée comme dans l'étude de Casteran et al. (2013), et utilisée dans l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Dans la majorité des cas, la variance des données était expliquée de manière satisfaisante (≥95 %) par une (343 essais) ou deux composantes principales (213 essais), tandis qu'une troisième composante n'était nécessaire que rarement (5 essais). Cette mesure est appelée variance expliquée (VAF). Nous avons calculé la VAF pour la première (VAF-PC1) et la deuxième composante principale (VAF-PC2).

3.2.3.3. Analyses statistiques

Étant donné que le coefficient de variation (CVmoteur) ne peut pas être calculé au niveau de l'essai, il a été analysé à l'aide d'un modèle linéaire général (GLM). Les durées de mouvement, les paramètres des APAs et les paramètres cinématiques disponibles au niveau de l'essai ont été analysés à l'aide de LMM, afin de tenir compte de la variabilité intra-sujets et des mesures répétées sur les essais. Les LMM ont été réalisés avec JAMOVI 2.6.26 (The jamovi project (2022)) [logiciel informatique]. Disponible sur : https://www.jamovi.org. GAMLj3 : General analyses for linear models version 3. [Module jamovi]. Disponible sur : https://gamlj.github.io/. Les termes du modèle ont été hiérarchisés selon la méthode de Satterthwaite. L'effet fixe « Condition » a été codé en variable « simple » (*simple coding* en anglais). Les participants ont été inclus comme effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine (De Kock et al., 2023; Monfort et al., 2022). Lorsqu'un effet significatif était observé, une taille d'effet de type d a été calculée en divisant le coefficient de régression non standardisé par l'écart-type résiduel (Rouder et al., 2012).

3.2.3.4. Résultats

3.2.3.4.1. Durée du mouvement

Notre comparaison entre WBR-Nat et WBR-Temp ne révèle aucune différence significative en termes de durée du mouvement (WBR-Temp – WBR-Nat : $\beta = -16{,}1$, $p = .106$) ni en termes de CVmoteur (WBR-Temp – WBR-Nat : $\beta = -.04$, $p = .140$).

3.2.3.4.2. Ajustements posturaux anticipés

En ce qui concerne l'amplitude des APAs (voir Figure 13), l'effet fixe « Condition » a montré des différences significatives sur l'activation du biceps brachial (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 1{,}44$, $p < .001$, $d = .14$), l'activation du triceps brachial (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 3{,}55$, $p < .001$, $d = .14$), l'activation du deltoïde postérieur (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 1{,}79$,

p < .001, d = .19) et l'activation du tibial antérieur (WBR-Temp - WBR-Nat : β = -.88, p = .014, d = -.11).

En ce qui concerne les latences des APAs (voir Figure 14), l'effet fixe du contexte temporel WBR a montré des différences significatives au niveau du triceps brachial (WBR-Temp - WBR-Nat : β = -47,0, p = .032, d = .002), du biceps fémoral (WBR-Temp - WBR-Nat : β = 69,4, p = .009, d = .002) et du quadriceps médial (WBR-Temp - WBR-Nat : β = 49,9, p = .021, d = .002).

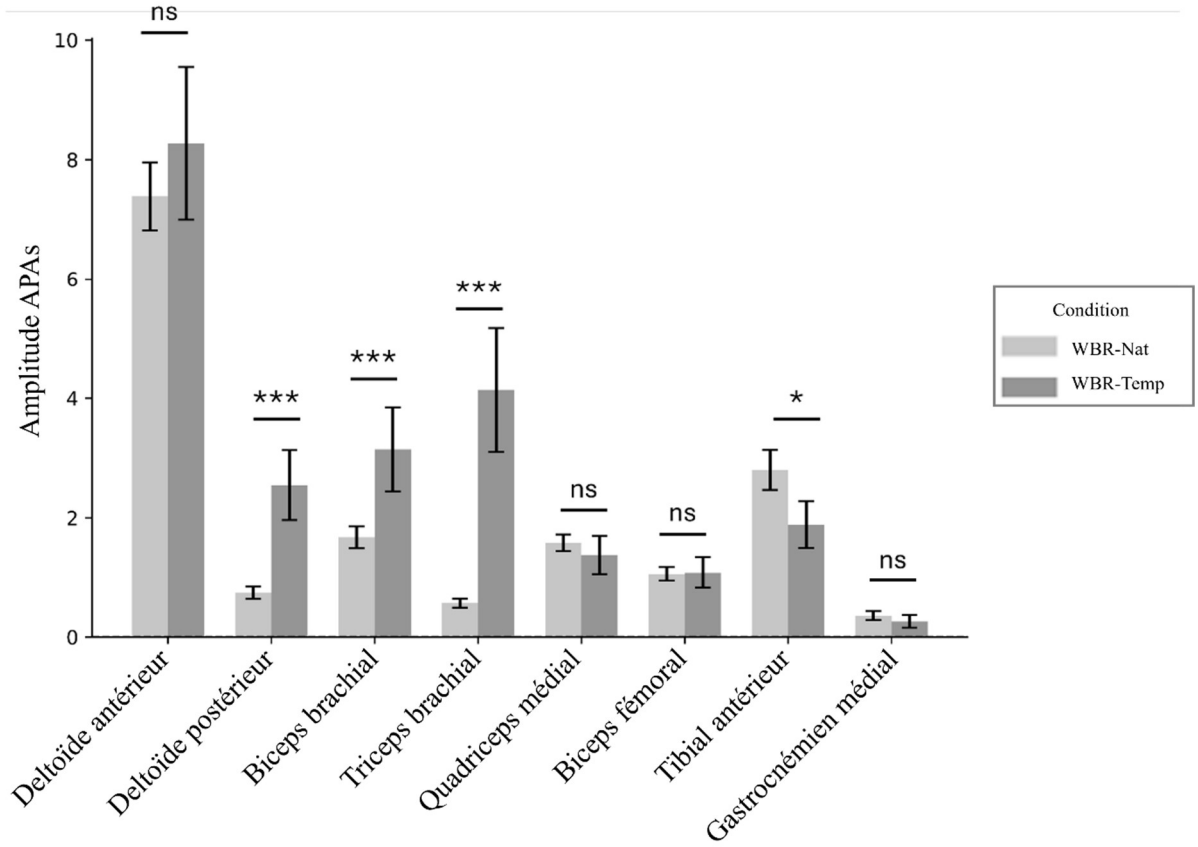


Figure 13 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires (APA) des mouvements d'atteinte du corps entier sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp).

Amplitude moyenne (± SE) des APAs pour les mouvements d'atteinte du corps entier (WBR) effectués à une vitesse naturelle sans contraintes temporelles (WBR-Nat) et sous contraintes

*temporelles (WBR-Temp). L'activité musculaire a été enregistrée à partir des muscles suivants : deltoïde antérieur, deltoïde postérieur, biceps brachial, triceps brachial, quadriceps fémoral, biceps fémoral, tibial antérieur et gastrocnémien médial. La signification statistique est indiquée comme suit : ns = non significatif ; * p < .05 ; *** p < .001.*

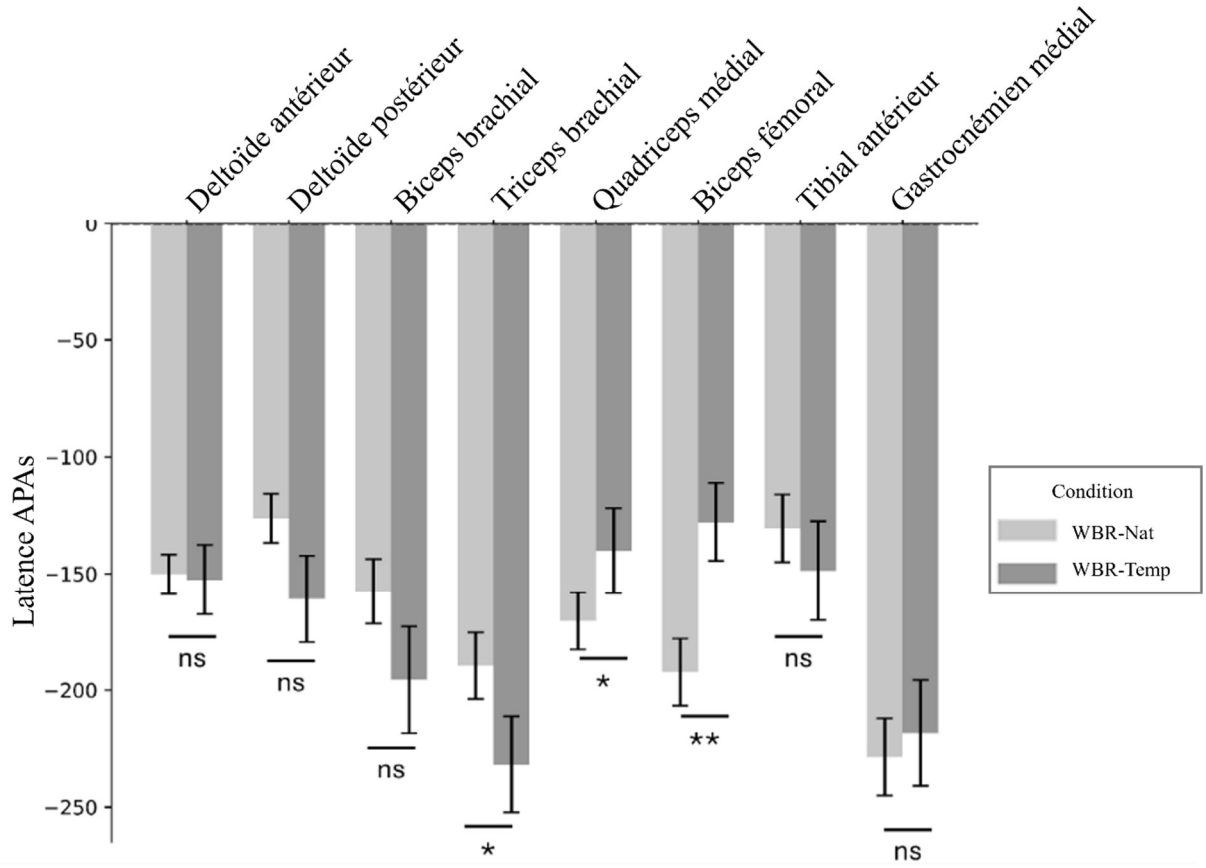


*Figure 14 : Latence des ajustements posturaux anticipatoires des mouvements d'atteinte du corps entier sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp). Latence moyenne (± SE) des ajustements posturaux anticipatoires (APA) pour les mouvements d'atteinte du corps entier (WBR) effectués à vitesse naturelle sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et sous contrainte temporelle (WBR-Temp). L'activité musculaire a été enregistrée à partir des muscles suivants : deltoïde antérieur, deltoïde postérieur, biceps brachial, triceps brachial, quadriceps fémoral, biceps fémoral, tibial antérieur et gastrocnémien médial. La signification statistique est indiquée comme suit : ns = non significatif ; * p < .05 ; ** p < .01.*

3.2.3.4.3. Cinématique du mouvement

En ce qui concerne les paramètres cinématiques, nous avons observé des différences entre WBR-Temp et WBR-Nat sur plusieurs aspects du doigt, du centre de masse et de la géométrie du mouvement.

Pour la cinématique du doigt (voir Figure 15), l'effet fixe de la « Condition » a montré des différences significatives sur le temps nécessaire pour atteindre le pic (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 9.41$, $p < .001$, $d = 0.08$) et le nombre de pics de vitesse (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 0.17$, $p < .001$, $d = 1.12$).

Pour le CoM, l'effet fixe de la « Condition » a montré des différences significatives sur la vitesse moyenne (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = -16.4$, $p = .003$, $d = -0.004$) et le nombre de pics de vitesse (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = -0.29$, $p < .001$, $d = -1.38$).

Pour la géométrie du mouvement (voir Figure 16), l'effet fixe de la « Condition » a montré des différences significatives sur les angles d'élévation de la cuisse (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -4.24$, $p < .001$, $d = -0.24$), du pelvis (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -1.85$, $p < .001$, $d = -0.13$), du tronc (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -1.34$, $p < .001$, $d = -0.18$), de la tête (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = 2.49$, $p < .001$, $d = 0.13$), l'humérus (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -2.75$, $p < .001$, $d = -0.4$), l'avant-bras (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -4.67$, $p < .001$, $d = -0.33$) et la main (WBR-Temp - WBR-Nat: $\beta = -9.92$, $p < .001$, $d = -0.26$). À partir de l'analyse en composantes principales, nous avons également observé un effet significatif de l'effet fixe de la « Condition » sur le VAF-PC1 (WBR-Temp - WBR-Nat : $\beta = 1$, $p = .01$, $d = 7$).

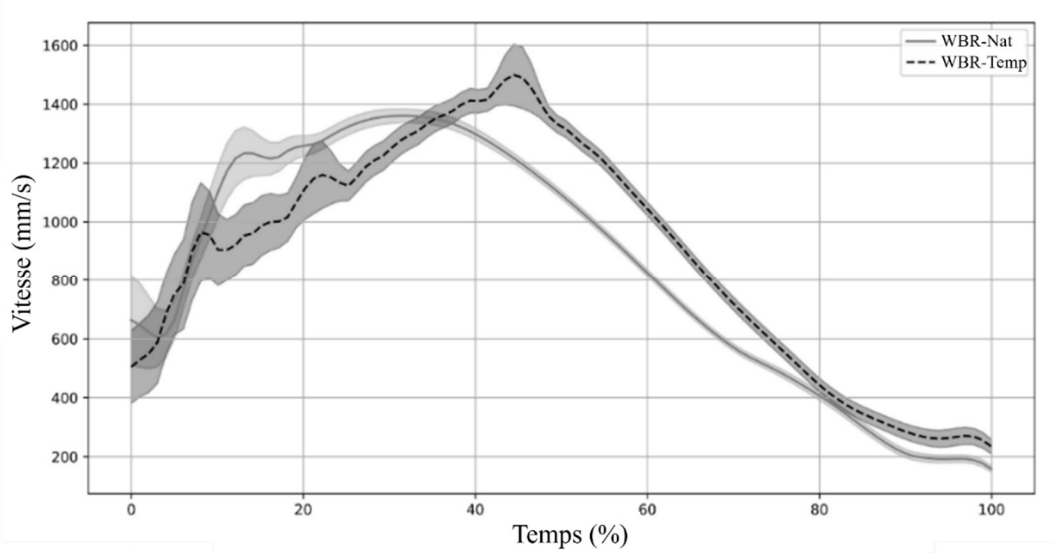


Figure 15 : Vitesse moyenne du doigt lors du mouvement d'atteinte du corps entier avec et sans objectif temporel

Vitesse moyenne du doigt (mm/s) au cours du temps (% de la durée du mouvement) pour les deux conditions. La ligne grise représente la condition naturelle d'atteinte avec tout le corps sans objectif temporel (WBR-Nat), et la ligne noire représente la condition avec un objectif temporel (WBR-Temp). Les zones ombrées représentent ±1 écart-type (ET) autour de la moyenne.

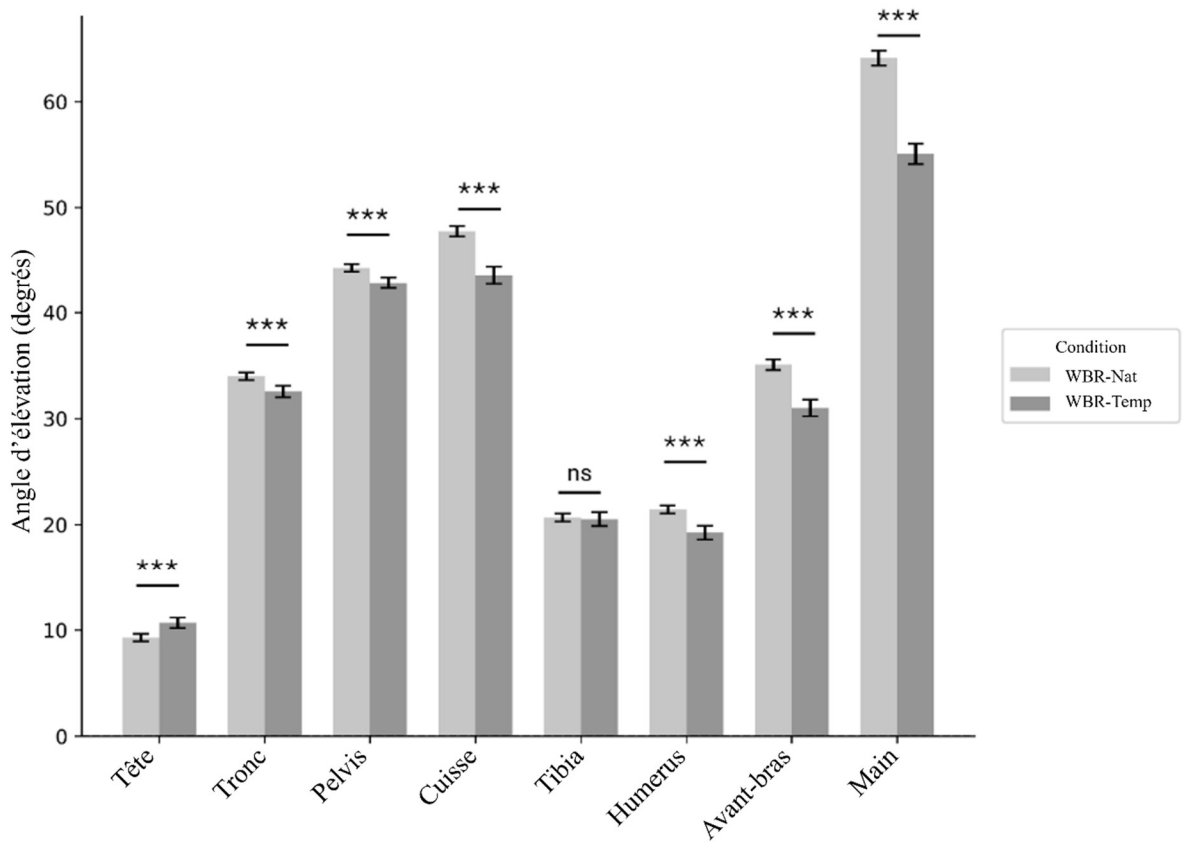


Figure 16 : Angles d'élévation (degrés) des différents segments du corps lors d'un mouvement d'extension du corps entier à vitesse naturelle sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et avec contrainte temporelle (WBR-Temp).

*Angles d'élévation moyens (± SE) des segments corporels suivants : tête, tronc, pelvis, cuisse, jambe, humérus, avant-bras et main. Nous avons comparé les mouvements effectués à une vitesse naturelle sans contrainte temporelle (WBR-Nat) et sous contrainte temporelle (WBR-Temp). La signification statistique est indiquée comme suit : ns = non significatif ; *** p < .001.*

3.2.3.5. Discussion

La présente étude avait pour objectif de déterminer comment un objectif temporel explicite module les phases préparatoires et d'exécution d'un mouvement de WBR avec une contrainte temporelle comparativement à sans contrainte temporelle, pour une durée de mouvement équivalente. Dans l'ensemble, nos résultats indiquent, bien que la durée des

mouvements soit restée similaire entre les deux conditions, une organisation motrice (i.e., APAs et paramètres cinématiques) différente selon la présence ou non d'un objectif temporel. Ces observations suggèrent qu'une intention de respecter un objectif temporel explicite module à la fois la préparation et l'exécution motrice, reflétant l'intégration d'objectifs temporels par le système moteur, comme proposé par Esposti et al. (2015).

Du point de vue préparatoire, les APAs contribuent à initier le mouvement (Pozzo et al., 2001; Stapley et al., 1999) et à maintenir la stabilité ainsi que l'alignement des segments corporels avant son déclenchement (Horak et al., 1984 ; Lee et al., 1987 ; Shiratori & Aruin, 2007). Les APAs s'adaptent à des caractéristiques spécifiques des mouvements focaux, telles que la direction (Aruin & Latash, 1995), l'amplitude (Aruin & Shiratori, 2004), la précision spatiale (Bertucco & Cesari, 2010; Bonnetblanc et al., 2004; Nana-Ibrahim et al., 2008) et la vitesse (Horak et al., 1984; Shiratori & Aruin, 2007). Bien que la relation entre APAs et vitesse soit bien documentée, notamment la dépendance de la latence des APAs vis-à-vis de la vitesse du mouvement (Horak et al., 1984 ; Lee et al., 1987 ; Shiratori & Aruin, 2007), la question de savoir si le facteur déterminant de ces variations provient de la vitesse intentionnelle ou de la vitesse réelle reste débattue (Esposti et al., 2015). Nos résultats ont révélé des différences marquées dans les aspects spatio-temporels des APAs lors de mouvements de WBR effectués avec ou sans objectif temporel. En effet, la condition WBR-Temp a montré une activation précoce ainsi que des amplitudes plus élevées pour les muscles focaux, et une activation plus tardive et plus faible pour les muscles des membres inférieurs, traduisant probablement une focalisation sur le mouvement d'atteinte par rapport à la condition WBR-Nat. En accord avec Esposti et al. (2015), le fait que ces ajustements apparaissent malgré des durées de mouvement similaires renforce l'idée que l'objectif temporel est intégré précocement par le système moteur. En outre, nos résultats confirment que le contrôle moteur est flexible et dépendant de la tâche,

et suggèrent que le système moteur peut se réorganiser pour satisfaire des objectifs multidimensionnels (i.e., objectif temporel et spatial).

Durant la phase d'exécution, nous observons également des modulations significatives associées à l'objectif temporel. Les analyses du doigt ont indiqué un nombre d'ajustements de trajectoire plus important dans la condition WBR-Temp comparativement à WBR-Nat, tandis qu'on observe des angles d'élévation plus importants en WBR-Nat qu'en WBR-Temp. Ces résultats sont cohérents avec ceux de travaux antérieurs ayant étudié différentes durées de mouvement de WBR (e.g., Casteran et al., 2013). Nos résultats suggèrent un schéma de déplacement plus unifié sous contrainte temporelle explicite, probablement via l'adoption d'un programme moteur dominant. Un tel programme réduirait la variabilité angulaire entre les segments corporels en mettant l'accent sur le mouvement focal, en accord avec l'idée que le système moteur répartit de façon optimale l'effort pour satisfaire simultanément précision temporelle, précision spatiale et stabilité posturale (McNamee & Wolpert, 2019; Todorov, 2004). La variance plus élevée expliquée par la première composante principale en WBR-Temp conforte cette interprétation, indiquant qu'un nombre réduit de composantes principales est suffisant pour décrire le schéma global du mouvement. À l'inverse, la plus grande variation observée en WBR-Nat pourrait refléter la tendance du système à exploiter un espace de solutions plus large en l'absence de contrainte temporelle, permettant aux participants davantage de variabilité dans les composantes posturales et focales tout en atteignant l'objectif spatial. Dans cette condition, le temps ne serait pas un objectif, mais un sous-produit du mouvement.

Ces différences indiquent que l'objectif temporel explicite est incorporé dès la phase de planification, puis maintenu dans la boucle de contrôle en ligne. Cette interprétation prolonge le modèle hybride de Desmurget et Grafton (2000), historiquement formulé pour des objectifs spatiaux. Nous proposons que l'objectif du mouvement puisse être spécifié non seulement en

coordonnées spatiales, mais aussi en coordonnées temporelles. Ainsi, le plan moteur initial inclurait des contraintes temporelles comme variables à satisfaire, au même titre que la précision spatiale, modulant l'organisation des APAs et la structure cinématique. Des études futures seront nécessaires afin d'explorer davantage cette proposition.

Ces résultats s'accordent également avec les théories du contrôle optimal. Dans les paradigmes d'atteinte où les compromis vitesse-précision ont été largement explorés, on suppose que les commandes motrices optimisent une fonction de coût interne intégrant précision, dépense énergétique et fluidité (Todorov, 2004 ; Todorov & Jordan, 2002). Les résultats présents prolongent ces travaux en soulignant la nécessité d'incorporer explicitement l'objectif temporel dans ces modèles. D'un côté, la condition WBR-Temp pourrait être conceptualisée comme l'implémentation d'une pénalisation plus forte des déviations temporelles, conduisant les participants à développer une synergie plus unifiée pour les composantes posturales et focales. De l'autre, la condition WBR-Nat, sans contrainte temporelle explicite, permet une plus grande liberté de mouvement, en accord avec le principe de « minimal intervention » décrit par Todorov & Jordan (2002). De futurs travaux de modélisation computationnelle pourraient s'appuyer sur ces résultats afin de fournir des précisions quantitatives sur la manière dont les fonctions de coût sont repondérées lorsqu'une contrainte temporelle est introduite.

3.2.3.6. Conclusion

En conclusion, la présente étude démontre qu'un objectif temporel explicite lors d'un mouvement de WBR entraîne des ajustements dans les phases préparatoires et d'exécution, malgré des durées de mouvement similaires. En condition WBR-Temp, les participants adoptent des solutions motrices caractérisées par une plus forte covariation entre les segments et des ajustements plus importants du mouvement focal, ainsi qu'une préparation plus précoce

des muscles focaux par rapport à la condition WBR-Nat. Ces résultats renforcent l'idée que le contrôle moteur est flexible et capable d'intégrer un objectif temporel dans le programme moteur, conjointement à l'objectif spatial. De futures investigations devront étendre ces recherches afin de déterminer la place de l'objectif temporel dans les modèles actuels de contrôle moteur.

3.2.4. Étude 3 : Mouvements d'atteintes du corps entier contraint temporellement

Par l'étude 2, nous avons observé que l'organisation motrice peut intégrer l'objectif temporel explicite et mène à des ajustements dans les phases préparatoires et d'exécution du mouvement par rapport à un mouvement sans objectif temporel explicite. Dans la continuité de ce contexte, la présente étude répond à l'objectif 3 de la thèse, visant à analyser les stratégies motrices employées selon différents objectifs temporels et à identifier si certaines stratégies motrices sont associées à une meilleure capacité de régulation d'un mouvement de WBR contraint temporellement. Autrement dit, nous souhaitons déterminer comment différents objectifs temporels explicites modulent la préparation et l'exécution du mouvement et identifier si certaines stratégies motrices sont associées à une meilleure précision temporelle. Pour ce faire, nous considérons uniquement les essais de la tâche de reproduction temporelle en WBR (RT-WBR) pour les durées très courte (TC), moyenne (M) et très longue (TL).

3.2.4.1. Collecte des données

La procédure de collecte des données comportementales, EMG et cinématique pour chaque durée est identique à celle de l'étude 2 (voir Section 3.2.3.1. Collecte des données).

3.2.4.2. Traitement des données

Tous les traitements des données ont été réalisés à l'aide d'un script personnalisé développé en Python dans l'environnement Jupyter Notebook 7.2.2 (Python 3).

3.2.4.2.1. Durée du mouvement

Les durées de mouvements RT-WBR pour chaque essai a été calculée en millisecondes comme l'intervalle de temps entre le relâchement du bouton fixé à la cuisse et l'appui sur le bouton-cible. Les essais comportant des erreurs (i.e., problèmes techniques) ont été exclus (moyenne = 4.5 essais par participant ; n = 64 essais). Pour évaluer la précision temporelle des participants dans la reproduction de l'IC, nous avons calculé pour chaque essai de chaque durée et mouvement, le ratio IR/IC. De plus, nous avons calculé le coefficient de variation de la durée du mouvement (CVmoteur) pour chaque IC et chaque participant.

3.2.4.2.2. Ajustements posturaux anticipés

La procédure de traitement des signaux EMG pour l'analyse des APAs pour chaque durée est identique à celle de l'étude 2 (voir Section 3.2.3.2.2. Ajustements posturaux anticipés).

3.2.4.2.3. Cinématique du mouvement

Le traitement des données cinématiques pour chaque durée est identique à celui de l'étude 2 (voir Section 3.2.3.2.3. Cinématique du mouvement).

3.2.4.3. Analyses statistiques

Étant donné que le coefficient de variation (CVmoteur) ne peut pas être calculé au niveau de l'essai, il a été analysé à l'aide d'un modèle linéaire général (GLM). Les durées de mouvement et le ratio IR/IC étant disponibles au niveau de l'essai, nous avons appliqué une analyse par des modèles LMM.

3.2.4.3.1. Organisation motrice en fonction de la durée

Les paramètres des APAs et les paramètres cinématiques disponibles au niveau de l'essai ont été analysés à l'aide de modèles LMM, afin de tenir compte de la variabilité intra-sujets et des mesures répétées sur les essais. Les LMM ont été réalisés avec JAMOVI 2.6.26 (The jamovi

project (2022)) [logiciel informatique]. Disponible sur : https://www.jamovi.org — Gallucci, M. (2019). GAMLj3 : General analyses for linear models version 3. [Module jamovi]. Disponible sur : https://gamlj.github.io/. Les termes du modèle ont été hiérarchisés selon la méthode de Satterthwaite. L'effet fixe « Durée » a été codé en variable « simple » (*simple coding* en anglais). Les participants ont été inclus comme effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine (De Kock et al., 2023; Monfort et al., 2022).

3.2.4.3.1. Préparation motrice en fonction des performances

Nous avons mené une analyse exploratoire pour identifier les stratégies motrices en phase de préparation en fonction des performances. Sur la base du ratio IR/IC, la variable indépendante « Performance » a été définie a posteriori comme suit : les valeurs inférieures à .96 ont été classées comme sous-estimées, les valeurs supérieures à 1,04 comme surestimées, et les valeurs comprises entre .96 et 1.04 comme exactes. Le seuil de 4 % est cohérent avec la méthodologie de Macar et al. (1999), qui ont considéré comme corrects les essais situés dans l'intervalle 2 500 ± 100 ms, soit ± 4 %, dans une tâche de production temporelle. Les paramètres spatio-temporels des APAs disponibles au niveau de l'essai ont ainsi été analysés à l'aide de modèle LMM, en fonction de l'effet fixe « Performance ». Les termes du modèle ont été hiérarchisés selon la méthode de Satterthwaite. L'effet fixe a été codé en variable « simple » (*simple coding* en anglais). Les participants ont été inclus comme effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine (De Kock et al., 2023; Monfort et al., 2022).

3.2.4.4. Résultats

3.2.4.4.1. Durée du mouvement

L'effet fixe de la « Durée » sur la durée du mouvement était statistiquement significatif ($p < .001$). Les tests *post hoc* avec correction de Holm ont indiqué des différences significatives entre TC et TL ($\beta = -524$, $p < .001$), entre TC et M ($\beta = -200$, $p < .001$), et entre les durées M et

TL (β = -324, p < .001). De plus, l'effet fixe de la « Durée » sur le ratio IR/IC était statistiquement significatif (p < .001). Les tests *post hoc* avec correction de Holm ont indiqué des différences significatives entre TC et TL (β = .13, p < .001), entre TC et M (β = .10, p < .001), et entre les durées M et TL (β = -.03, p = .013). Enfin, l'effet fixe de la « Durée » sur le CVmoteur n'était pas statistiquement significatif (p = .681).

3.2.4.4.1. Organisation motrice en fonction des durées

3.2.4.4.1.1. Ajustements posturaux anticipés

En ce qui concerne l'amplitude des APAs, l'effet fixe de la « Durée » a montré des différences significatives sur l'activation du biceps brachial (p < .001), du triceps brachial (p = .004), du deltoïde postérieur (p < .001), du deltoïde antérieur (p < .001), du quadriceps médial (p < .001), du biceps fémoral (p = .02), du gastrocnémien médial (p = .023) et du tibial antérieur (p < .001). Les analyses *post hoc* pour chaque effet significatif sont détaillées dans le Tableau 2.

En ce qui concerne les latences des APAs, l'effet fixe de la « Durée » a montré des différences significatives au niveau du triceps brachial (p = .02), du deltoïde postérieur (p = .018) et du tibial antérieur (p = .007). Les analyses *post hoc* pour chaque effet significatif sont détaillées dans le Tableau 3.

Amplitude APAs	Durée	vs	Durée	Différence	SE	Pholm
Biceps brachial	TC	-	M	0.869	0.594	0.145
	TC	-	TL	3.364	0.606	**<.001**
	M	-	TL	2.495	0.6	**<.001**
Triceps brachial	TC	-	M	-0.654	0.802	0.415
	TC	-	TL	1.979	0.817	**0.032**
	M	-	TL	2.634	0.81	**0.004**
Deltoïde postérieur	TC	-	M	0.0315	0.51	0.951
	TC	-	TL	1.8172	0.519	**0.002**
	M	-	TL	1.7857	0.515	**0.002**
Deltoïde antérieur	TC	-	M	4.31	1.05	**<.001**
	TC	-	TL	7.84	1.07	**<.001**
	M	-	TL	3.52	1.06	**0.001**
Quadriceps médial	TC	-	M	0.885	0.306	**0.008**
	TC	-	TL	1.612	0.312	**<.001**
	M	-	TL	0.727	0.309	**0.02**
Biceps fémoral	TC	-	M	0.445	0.318	0.293
	TC	-	TL	0.913	0.324	**0.016**
	M	-	TL	0.468	0.321	0.293
Gastrocnémien médial	TC	-	M	0.3309	0.147	**0.051**
	TC	-	TL	0.3781	0.15	**0.037**
	M	-	TL	0.0472	0.149	0.751
Tibial antérieur	TC	-	M	0.985	0.406	**0.016**
	TC	-	TL	2.594	0.413	**<.001**
	M	-	TL	1.609	0.41	**<.001**

Tableau 2 : Analyse post-hoc des amplitudes des ajustements posturaux anticipés en fonction des durées cibles

Le tableau présente uniquement les muscles pour lesquels une différence entre les durées a été identifiée lors de l'analyse. Il comprend les mesures statistiques suivantes pour chaque analyse : différence moyenne (Différence), erreur standard (SE), valeur p après application de la correction de Holm (Pholm). Les durées sont notées TC (très courte), M (moyenne) et TL (très longue).

Latence APAs (ms)	Durée	vs	Durée	Différence	SE	Pholm
Triceps brachial	TC	-	M	36.3	19	0.111
	TC	-	TL	-17.5	20	0.381
	M	-	TL	-53.8	20	**0.022**
Deltoïde postérieur	TC	-	M	-28.7	21	0.264
	TC	-	TL	-63	22	**0.014**
	M	-	TL	-34.3	23	0.264
Tibial antérieur	TC	-	M	-53.6	30	0.149
	TC	-	TL	-104.3	33	**0.006**
	M	-	TL	-50.8	34	0.149

Tableau 3 : Analyse post-hoc des latences des ajustements posturaux anticipés en fonction des durées cibles

Le tableau présente uniquement les muscles pour lesquels une différence entre les durées a été identifiée lors de l'analyse. Il comprend les mesures statistiques suivantes pour chaque analyse : différence moyenne (Différence), erreur standard (SE), valeur p après application de la correction de Holm (Pholm). Les durées sont notées TC (très courte), M (moyenne) et TL (très longue).

3.2.4.4.1.2. Cinématique du mouvement

En ce qui concerne les paramètres cinématiques, nous avons observé des différences entre les différentes durées sur plusieurs aspects du doigt, du centre de masse et de la géométrie du mouvement. Pour la cinématique des paramètres du doigt, l'effet fixe de la « Durée » a montré des différences significatives sur la vitesse maximale ($p = .004$), la vitesse moyenne ($p < .001$), et le nombre de pics de vitesse ($p < .001$), mais pas pour le temps nécessaire pour atteindre le pic de vitesse maximale ($p = .064$). Pour le CoM, l'effet fixe de la « Durée » a montré des différences significatives sur la vitesse maximale ($p < .001$), la vitesse moyenne ($p < .001$), le temps nécessaire pour atteindre le pic de vitesse maximale ($p < .001$), et le nombre de pics de vitesse ($p < .001$). Pour la géométrie du mouvement, à partir de l'analyse en composantes principales, nous avons observé un effet significatif de l'effet fixe de la « Durée »

sur le VAF-PC1 (p = .049) et VAF-PC2 (p = .026). Les analyses *post hoc* pour chaque effet significatif sont détaillées dans le Tableau 4.

	Paramètres	Durée	vs	Durée	Différence	SE	Pholm
Doigt	Vitesse maximale (mm/s)	TC	-	M	1531	479	**0.004**
		TC	-	TL	1195	481	**0.027**
		M	-	TL	-336	484	0.488
	Vitesse moyenne (mm/s)	TC	-	M	407	66.7	**<.001**
		TC	-	TL	584	66.9	**<.001**
		M	-	TL	177	67.4	**0.009**
	Nombre de pics de vitesse	TC	-	M	-0.257	0.0462	**<.001**
		TC	-	TL	-0.454	0.0464	**<.001**
		M	-	TL	-0.198	0.0467	**<.001**
CoM	Vitesse maximale (mm/s)	TC	-	M	377.3	90.8	**<.001**
		TC	-	TL	439	88.7	**<.001**
		M	-	TL	61.7	91.8	0.502
	Temps du pic de vitesse maximale (%)	TC	-	M	-1.93	0.865	**0.026**
		TC	-	TL	-5.76	0.844	**<.001**
		M	-	TL	-3.83	0.875	**<.001**
	Vitesse moyenne (mm/s)	TC	-	M	139.8	12.2	**<.001**
		TC	-	TL	229.2	11.9	**<.001**
		M	-	TL	89.4	12.3	**<.001**
	Nombre de pics de vitesse	TC	-	M	-0.0846	0.0521	0.105
		TC	-	TL	-0.5952	0.0508	**<.001**
		M	-	TL	-0.5107	0.0526	**<.001**
Géométrie du mouvement	VAF1	TC	-	N	-0.0033	0.0044	0.456
		TC	-	TL	0.0074	0.0043	0.177
		N	-	TL	0.0107	0.0045	**0.053**
	VAF2	TC	-	N	-0.0008	0.0037	0.812
		TC	-	TL	-0.008	0.0036	**0.048**
		N	-	TL	-0.009	0.0037	**0.048**

Tableau 4 : Analyse post-hoc des paramètres cinématiques du doigt, du centre de masse (CoM) et de la structure géométrique du mouvement, en fonction des durées cibles

Le tableau ne rapporte que les variables présentant un effet principal significatif dans l'analyse. Il comprend les mesures statistiques suivantes pour chaque analyse : différence moyenne (Différence), erreur standard (SE), valeur p après application de la correction de Holm (Pholm). Les durées sont notées TC (très courte), M (moyenne) et TL (très longue).

3.2.4.4.2. Préparation motrice en fonction des performances

3.2.4.4.2.1. Durée très courte

Pour les durées très courtes (voir Figure 17), nous avons observé un effet significatif de l'effet fixe de la « Performance » sur l'amplitude du deltoïde antérieur ($p < .001$), du deltoïde postérieur ($p = .02$), du quadriceps médial ($p = .011$) et du tibial antérieur ($p = .004$). Les analyses *post hoc* pour chaque effet significatif sont détaillées dans le Tableau 5.

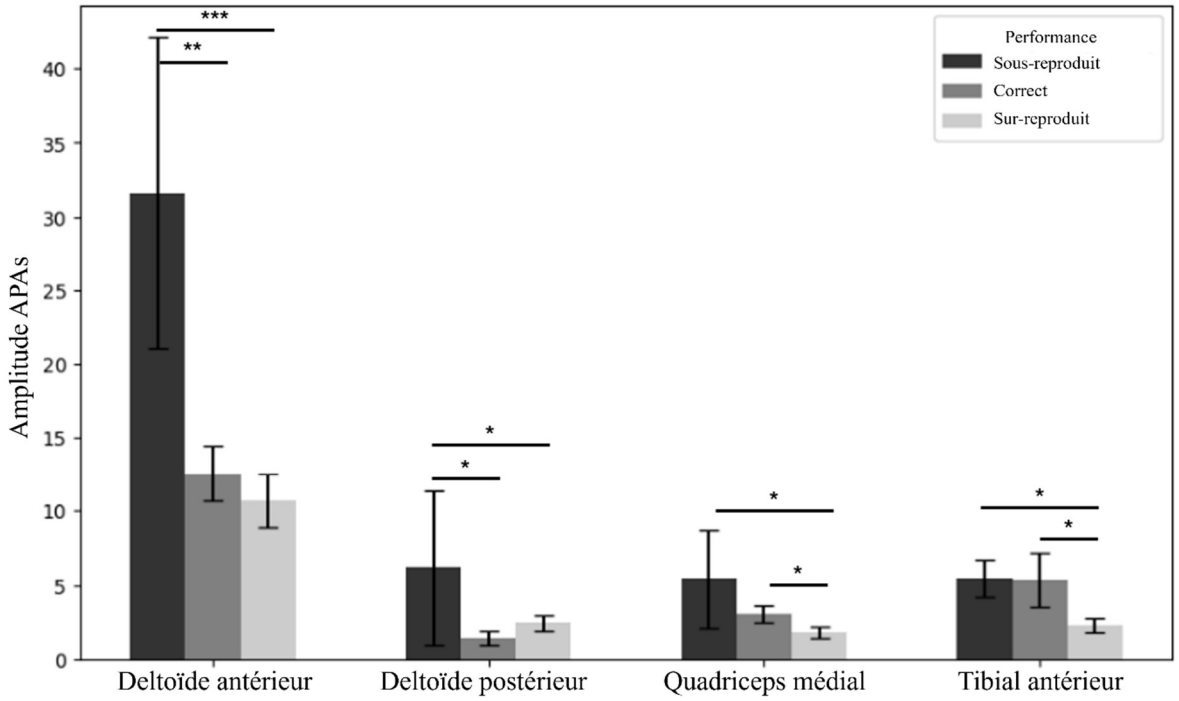


Figure 17 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour chaque muscle pour la durée très courte en fonction des performances

*Représentation de la valeur moyenne de l'amplitude de l'APAs du deltoïde antérieur et postérieur, quadriceps médial et tibial antérieur, en fonction de la Performance (sous-estimée, correcte, surestimée) pour la durée très courte. Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne (ET) pour chaque muscle et chaque catégorie de performances. La significativité statistique est indiquée de la manière suivante : * : $p < .05$, ** : $p < .01$, and *** : $p < .001$.*

Amplitude APAs	Comparaison			Post-hoc		
	Performance			Différence	SE	Pholm
Deltoïde antérieur	Correct	-	Sur-reproduction	3.51	2.44	0.154
	Sous-reproduction	-	Correct	11.98	3.79	**0.004**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	15.50	3.72	**< .001**
Deltoïde postérieur	Correct	-	Sur-reproduction	0.645	1.23	0.603
	Sous-reproduction	-	Correct	4.641	1.92	**0.036**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	5.286	1.88	**0.018**
Quadriceps médial	Correct	-	Sur-reproduction	2.01	0.872	**0.048**
	Sous-reproduction	-	Correct	1.43	1.357	0.294
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	3.44	1.328	**0.034**
Tibial antérieur	Correct	-	Sur-reproduction	2.43	1.03	**0.043**
	Sous-reproduction	-	Correct	2.44	1.61	0.133
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	4.87	1.57	**0.008**

Tableau 5 : Analyse post hoc pour la durée très courte en fonction des performances

Les résultats comprennent l'amplitude du deltoïde antérieur, du deltoïde postérieur, du quadriceps médial et du tibial antérieur, en fonction de la Performance (sous-estimée, correcte, surestimée) pour la durée très courte. Il comprend les mesures statistiques suivantes pour chaque analyse : différence moyenne (Différence), erreur standard (SE) et la valeur p après application de la correction de Holm (Pholm).

3.2.4.4.2.2. Durée moyenne

Pour les durées moyennes (voir Figure 18), nous avons observé un effet significatif de l'effet fixe de la Performance sur l'amplitude du biceps brachial (p = .002), du triceps brachial (p = 0.012), du deltoïde postérieur (p = .035) et du tibial antérieur (p = .015). Les analyses post-hoc pour chaque effet significatif sont détaillées dans le Tableau 6.

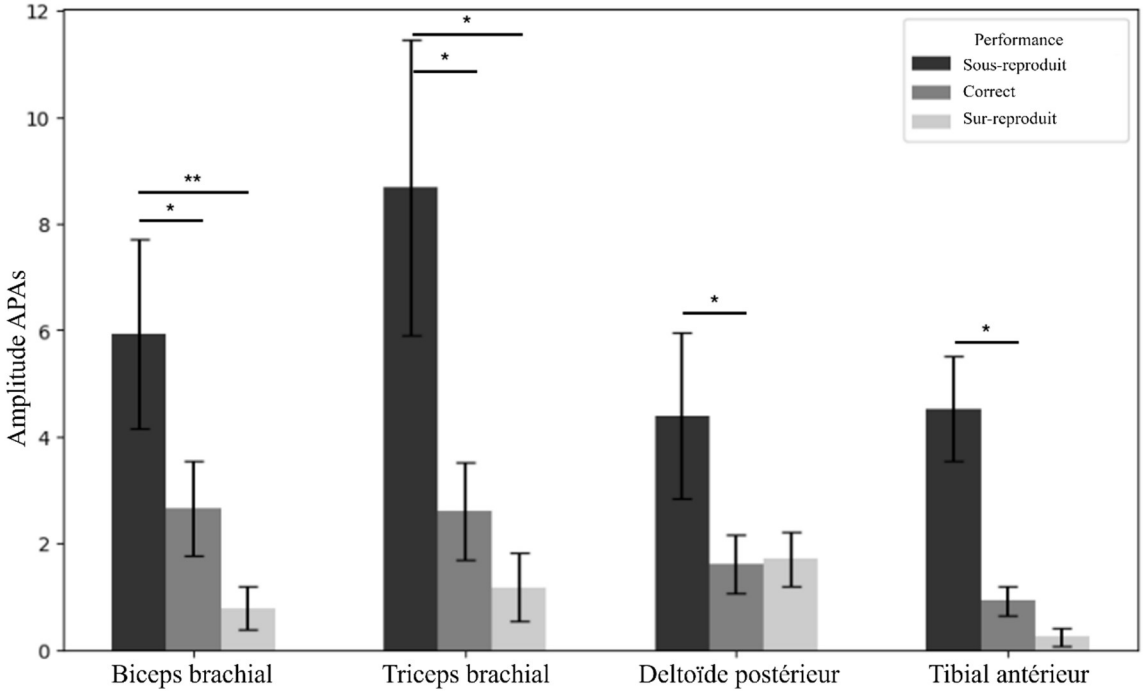


Figure 18 : Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour chaque muscle pour la durée moyenne en fonction des performances.

*Représentation de la valeur moyenne de l'amplitude de l'APAs du biceps brachial, triceps brachial, deltoïde postérieur et tibial antérieur, en fonction de la Performance (sous-estimée, correcte, surestimée) pour la durée moyenne. Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne (ET) pour chaque muscle et chaque catégorie de performance. La significativité statistique est indiquée de la manière suivante : * : p < .05, ** : p < .01, and *** : p < .001.*

Amplitude APAs	Comparaison Performance			Post-hoc Différence	SE	Pholm
Biceps brachial	Correct	-	Sur-reproduction	0.904	0.733	0.221
	Sous-reproduction	-	Correct	2.066	0.726	**0.011**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	2.970	0.854	**0.002**
Triceps brachial	Correct	-	Sur-reproduction	0.0821	1.52	0.957
	Sous-reproduction	-	Correct	4.3212	1.50	**0.015**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	4.4033	1.77	**0.029**
Deltoïde postérieur	Correct	-	Sur-reproduction	-0.0121	1.06	0.991
	Sous-reproduction	-	Correct	2.6310	1.06	**0.044**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	2.6189	1.24	0.075
Tibial antérieur	Correct	-	Sur-reproduction	-0.157	0.696	0.823
	Sous-reproduction	-	Correct	1.970	0.690	**0.016**
	Sous-reproduction	-	Sur-reproduction	1.813	0.810	0.055

Tableau 6 : Analyse post hoc pour la durée moyenne en fonction des performances

Les résultats comprennent l'amplitude du biceps brachial, du triceps brachial, du deltoïde postérieur et du tibial antérieur. Le tableau comprend les mesures statistiques suivantes pour chaque analyse : différence moyenne (Différence), erreur standard (SE) et la valeur p après application de la correction de Holm (p).

3.2.4.4.2.3. Durée très longue

Dans les conditions longues (voir Figure 19), nous n'avons observé qu'un effet significatif de l'effet fixe de la Performance sur l'amplitude du deltoïde postérieur (p = .038). Les tests *post hoc* avec correction de Holm ont indiqué des différences significatives entre la sous-estimation et la surestimation (p = .041), mais pas entre l'estimation correcte et la surestimation (p = .161) ni entre la sous-estimation et l'estimation correcte (p = .399).

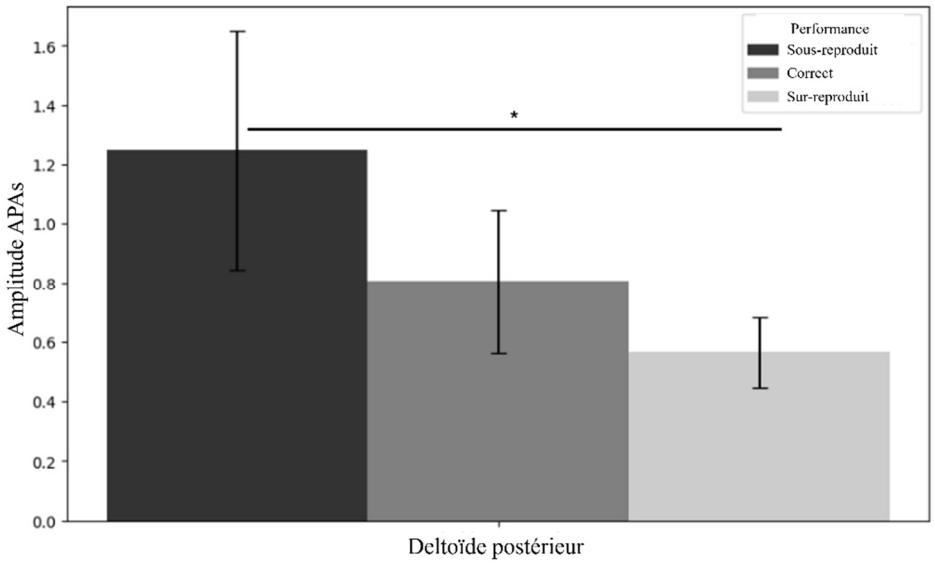


Figure 19: Amplitude des ajustements posturaux anticipatoires pour le deltoïde postérieur pour la durée très longue en fonction des performances.

*Représentation de la valeur moyenne de l'amplitude de l'APAs du deltoïde postérieur, regroupée par la Performance (sous-estimée, correcte, surestimée) pour la durée très longue. Les barres d'erreur représentent l'écart type de la moyenne (ET) pour chaque muscle dans chaque catégorie de performance. La significativité statistique est indiquée de la manière suivante : * : p < .05.*

3.2.4.5. Discussion

La présente étude avait pour objectif de déterminer comment différents objectifs temporels explicites modulent les phases préparatoires et d'exécution d'un mouvement de WBR et identifier les stratégies motrices associées à une meilleure capacité de régulation d'un mouvement de WBR contraint temporellement. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que les APAs, ainsi que les paramètres cinématiques varient en fonction de l'IC, et que des patrons d'APAs spécifiques caractérisent les essais temporellement corrects pour des durées très courte et moyenne.

3.2.4.5.1. Préparation et exécution du mouvement sous contraintes temporelles explicites

Les latences des APAs indiquent un déclenchement plus précoce du deltoïde postérieur et du tibial antérieur pour les durées TC vs TL. En amplitude, des effets significatifs apparaissent pour le biceps brachial, le triceps brachial et le deltoïde postérieur entre TL et les durées M/TC, tandis que le deltoïde antérieur et le tibial antérieur diminuent linéairement de la condition courte à la condition longue. Des patrons d'APAs spécifiques aux essais corrects montrent que la préparation motrice soutient la précision temporelle pour les durées courtes et moyennes. Pour les durées TC, les essais corrects s'accompagnent d'une forte activation du tibial antérieur et du vaste médial, et d'une moindre activation du biceps et du triceps. Pour les durées M, les essais corrects présentent une activation globale plus faible des muscles focaux et propulsifs que les essais sous- et sur-reproduits. En revanche, pour les durées très longues, nous n'avons pas mis en évidence de stratégie de préparation distincte conduisant à des essais exacts par rapport aux essais sur- ou sous-estimés. Ces observations suggèrent que la préparation motrice joue un rôle plus décisif pour la précision temporelle pour les durées courtes et moyennes que pour les durées longues.

L'analyse cinématique lors de l'exécution du mouvement renforce cette suggestion. En effet, nous avons observé des différences significatives selon la durée. En particulier ceux du CoM, montrent une segmentation accrue du mouvement dans les durées TL. Une VAF1 plus faible et une VAF2 plus élevée en TL indiquent une réduction de la coordination inter-segmentaire et la mise en œuvre de modules moteurs secondaires. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Berret et al. (2009), suggérant qu'une augmentation de la VAF2 reflète une différenciation accrue entre contrôle postural et contrôle du mouvement focal sous des contraintes ou des demandes plus complexes (spatiales ou d'équilibre). Par ailleurs, les mouvements de WBR dans les conditions TL présentent davantage de corrections en ligne

(nombre accru de pics de vitesse du CoM et du doigt), suggérant une plus grande implication des rétroactions sensorielles pendant l'exécution. Selon les théories du contrôle moteur cognitif (Desmurget & Grafton, 2000), les patrons moteurs sont exécutés en vue d'un but avec des conséquences sensorielles prédites, et les travaux suggèrent que l'organisation du mouvement focal et des actions posturales est guidée par une commande motrice partagée (Berret et al., 2009; Bruttini et al., 2014; Cavallari et al., 2016; Leonard et al., 2011; Petersen et al., 2009). Par ailleurs, au cours du mouvement, les retours sensoriels sont utilisés pour évaluer la précision du plan moteur, le corriger et calibrer les modèles internes en vue d'actions ultérieures plus efficaces (Shadmehr et al., 2010 ; McNamee & Wolpert, 2019). La correction en ligne des mouvements d'atteinte ou de pointage a largement porté sur la précision spatiale (Gomi, 2008; Hudson et al., 2008; Paillard, 1996), et plus rarement sur la précision temporelle à différentes vitesses. Il a été proposé que le mécanisme de correction en ligne présente une latence minimale d'environ 100 ms et ajuste de manière optimale l'intensité de la réponse en fonction des informations sensorielles les plus récentes (Oostwoud Wijdenes et al., 2011). Ainsi, nous proposons que lorsque l'IC est supérieur à la durée naturelle, l'importance relative de la préparation motrice pour la précision temporelle décroît au profit des processus de correction en ligne. Cela pourrait en partie s'expliquer par le fait que les mouvements de plus longues durées offrent plus d'opportunités de correction, notamment au vu des latences minimales nécessaires (Desmurget et al., 1999; Fautrelle, Ballay, et al., 2010; Paillard, 1996; Prablanc & Martin, 1992), comparativement à des durées courtes.

3.2.4.5.2. Sur-reproduction pour les durées très courtes : contraintes biomécaniques et compromis vitesse-précision

La sur-reproduction observée pour les durées TC peut s'expliquer par les contraintes motrices propres aux mouvements rapides. Selon Schmidt et al. (1979), à taille de cible et amplitude identiques, une durée plus courte (vitesse plus élevée) accroît la difficulté de la tâche

en raison des limites biomécaniques et d'une dynamique accrue. Dans cette perspective, les participants pourraient alors privilégier la précision spatiale au détriment de la précision temporelle, car une erreur spatiale compromet le succès global du mouvement, alors qu'une erreur temporelle partielle n'entraîne pas nécessairement d'échec. De plus, dans le cas d'un mouvement du corps entier, la conservation de l'équilibre pourrait être un objectif plus important que ces deux objectifs. Ainsi, lorsque la contrainte biomécanique devient trop importante, le programme moteur pourrait converger vers une durée de mouvement naturelle moins contraignante en termes de facteurs biomécaniques, énergétiques et liés au confort. Ceci fait écho aux principes de la théorie du contrôle optimal (Todorov, 2004; Todorov & Jordan, 2002). Selon ces principes, la commande motrice est le résultat de l'optimisation d'une fonction de coût interne, combinant des contraintes de précision, d'efficacité énergétique, de confort, et de fluidité du mouvement. Dans cette perspective, les mouvements ne sont pas simplement planifiés pour minimiser l'erreur, mais résultent d'un compromis global entre différentes exigences concurrentes (ici, conservation de l'équilibre, objectif spatial et temporel). Dans le cas d'une durée TC, nos résultats montrent que la préparation motrice est plus importante que pour les durées TL, en revanche, le nombre de corrections lors du mouvement est moindre. Selon ces modèles, agir et apporter des corrections coûte cher, en raison des coûts liés au contrôle du bruit moteur et de la dépense énergétique. Dans ce cadre, selon la minimisation de l'intervention (*minimal intervention principle* en anglais ; Todorov & Jordan, 2002), les déviations temporelles ne sont corrigées activement que si elles compromettent significativement la performance globale. Or, dans notre tâche, la sur-reproduction temporelle, bien que mesurée, n'entraîne pas d'échec manifeste, contrairement à une erreur spatiale ou à une chute. Le système moteur peut donc tolérer une légère erreur temporelle pour éviter les coûts associés à une correction importante.

3.2.4.5.3. Limites et perspectives

Malgré les résultats apportés par notre étude, certaines limites doivent être soulignées. Les interprétations proposées ici constituent des cadres explicatifs plausibles, mais elles demeurent, à ce stade, spéculatives. Des recherches futures pourraient être orientées vers la validation expérimentale de ces hypothèses. En effet, des études précédentes montrent des adaptations des stratégies motrices lorsque le mouvement est effectué sans objectif temporel explicite, mais implicite (e.g., plus rapidement, naturellement ou lentement ; Casteran et al., 2013). Des études futures pourront par exemple comparer des mouvements de WBR avec des objectifs implicites (effectués à vitesse rapide, naturelle, lente) et des durées explicites. En outre, de futurs travaux de modélisation computationnelle pourraient fournir des précisions sur la manière dont les fonctions de coût sont repondérées en fonction de la durée cible et des contraintes biomécaniques inhérentes.

3.2.4.6. Conclusion

Pour conclure, nous suggérons que la préparation et l'exécution du mouvement sont modulés en fonction de la durée explicite de la tâche. Nous proposons que la préparation du mouvement joue un rôle décisif pour la précision temporelle pour les courtes et moyennes durées en particulier. En revanche, nous émettons l'hypothèse qu'avec l'augmentation de la durée, la correction en ligne du mouvement joue un rôle décisif pour la précision temporelle. Par ailleurs, la sur-reproduction observée pour les durées TC semble refléter une stratégie motrice adaptative, dans laquelle la précision spatiale est priorisée au détriment de la précision temporelle, en cohérence avec les principes du contrôle moteur optimal (Todorov, 2004). A notre connaissance, cette étude est parmi les premières à s'intéresser à la relation entre organisation motrice d'un mouvement de WBR et le timing explicite (pour revue De Kock et al., 2021).

3.3. Expérimentation 2 : Capacité prédictive des performances du jugement temporel sur la performance sensorimotrice

Les organismes doivent décider non seulement où se déplacer, mais également quand agir pour optimiser un comportement orienté vers un but (De Kock et al., 2021). Cette interaction entre mouvement et perception du temps est étayée par la neuroimagerie, qui met en évidence des réseaux partagés entre le jugement temporel et le contrôle moteur (Chen et al., 2008; Coull et al., 2011, 2016; Gordon et al., 2018; Grahn & Brett, 2007; Ross et al., 2018; Wiener et al., 2010a). Si cette interaction est demeurée relativement sous-explorée jusqu'à récemment (pour revue De Kock et al., 2021), un nombre croissant d'études montre que le mouvement, sur un large éventail de tâches et d'échelles temporelles, module activement la perception du temps et réciproquement (e.g., Binetti et al., 2010; Capelli et al., 2007; Fautrelle et al., 2015; Israël et al., 2004; Su & Pöppel, 2012; Wiener et al., 2019). Dans ce contexte, D'Andrea-Penna et al. (2020) ont proposé qu'une capacité de perception temporelle mesurée par un corrélat neurophysiologique (N1-P2) en écoute passive puisse prédire les performances sensorimotrices. Selon les auteurs, ce corrélat neurophysiologique pourrait servir comme un marqueur du traitement temporel. Cette proposition se base sur des expériences antérieures portant sur le timing des intervalles (*interval-based* en anglais) et le rythme (*beat-based* en anglais) suggérant que le complexe N1-P2 est un candidat prometteur en raison de sa modulation par l'attente temporelle (Duzcu, 2019; Duzcu et al., 2019; Kononowicz & van Rijn, 2014; Lange, 2009; Menceloglu et al., 2020; Schafer, 1982; Todorovic & de Lange, 2012). Le complexe N1–P2, déclenché par l'apparition, le décalage ou le changement de stimuli, indexe un traitement sensoriel précoce sensible à l'attente temporelle et peut être influencé par des mécanismes attentionnels descendants (*top-down* en anglais ; Hillyard et al., 1973; Näätänen, 1990; Parasuraman, 1978; Remijn et al., 2014). Dans l'étude de D'Andrea-Pena et al. (2020), les participants ont effectué une tâche auditive de type « oddball », durant laquelle ils écoutent

passivement des rythmes présentés selon deux conditions : longues et courtes. La configuration mise en place permet de comparer les réponses cérébrales à des stimuli standards et déviants, pour des séquences auditives physiquement identiques, mais qui varient en fonction de l'attente temporelle du rythme. A partir de ces réponses cérébrales, les auteurs ont extrait un indice de réponse temporelle (IRT) dérivé du complexe N1–P2 par l'attente, et ont montré que cet indice corrélait avec la performance d'une tâche de timing moteur, à savoir une synchronisation avec métronome intégrant une probabilité de battements manquants. Les auteurs concluent en suggérant que l'IRT pourrait servir de marqueur neuronal du traitement temporel en général. Toutefois, il convient de souligner que la portée de cette validation comportementale par l'IRT pourrait être limitée au contexte spécifique de synchronisation avec omissions. Se pose ainsi la question de savoir si cet indice est généralisable à d'autres tâches de timing moteur, comme une reproduction temporelle ou une tâche de synchronisation « classique » sans omissions. Cette interrogation s'inscrit dans un débat plus large entre l'hypothèse d'un mécanisme temporel central, partagé entre les différentes tâches de timing explicite (e.g., TTS) et des modèles distribués postulant des horloges multiples dépendantes du contexte, de la modalité et des exigences de la tâche (e.g., état des réseaux neuronaux), limitant la transférabilité d'un indice unique et suggérant que le N1–P2 modulé par l'attente temporel pourrait ne capturer qu'une (sous)-composante du timing (e.g., attention) dans un contexte spécifique. De plus, malgré des preuves croissantes selon lesquelles les mouvements influencent la perception du temps, et que la performance temporelle pourrait prédire les performances sensorimotrices, peu d'études se sont penchées sur cette relation, en particulier sur la manière dont des mouvements écologiques de tout le corps, tels que les tâches de WBR, affectent la perception du temps (e.g., Fautrelle et al., 2015 ; Gavazzi et al., 2013).

Dans ce travail, nous cherchons à déterminer si la capacité de perception temporelle telle que capturée par l'IRT peut constituer un marqueur neuronal du traitement temporel en général.

Plus spécifiquement, notre objectif est de déterminer si l'IRT prédit les performances dans des tâches de timing moteur, telles des tâches de reproduction temporelle impliquant des mouvements du doigt, mais aussi des mouvements de WBR, ainsi qu'une tâche de synchronisation sans omission (objectif 4 de la thèse). Comme objectif secondaire, nous cherchons à répliquer les résultats de notre première étude en comparant une tâche de reproduction temporelle impliquant des mouvements de WBR à une tâche de reproduction temporelle avec des mouvements du doigt, dans un contexte expérimental légèrement différent de celui de notre première étude (i.e., utilisation d'IC communs à l'ensemble des participants et la présentation aléatoire des IC dans chaque bloc). Pour répondre à l'objectif principal, nous examinerons les performances temporelles dans : (i) une tâche de synchronisation–continuation, qui consiste en une phase de synchronisation où les participants tapent en rythme avec un métronome auditif isochrone, suivie d'une phase de continuation où ils poursuivent le tapotement au même rythme en l'absence du métronome ; (ii) une tâche de reproduction temporelle consistant à reproduire un IC lors d'un mouvement de WBR ou de doigt; (iii) et une tâche d'écoute passive, utilisée pour extraire l'IRT, au cours de laquelle les participants sont exposés à deux conditions auditives : une condition déviante, impliquant une séquence régulière de 800 ms interrompue occasionnellement par un déviant temporel (à 400 ms), et une condition standard, consistant en une séquence isochrone de 400 ms où un son peut être omis. L'IRT sera corrélé avec les performances temporelles des tâches de timing moteur. De plus, trois tâches de contrôle seront utilisées afin d'estimer, pour chaque participant, le tempo spontané de tapping du doigt, ainsi que la vitesse naturelle et maximale des mouvements de WBR. Elles permettront, d'une part, de situer le rythme imposé en synchronisation par rapport au tempo spontané, et, d'autre part, de contrôler chaque IC en reproduction avec des mouvements de WBR en fonction des limites biomécaniques et de la vitesse naturelle de ce type de mouvement.

Selon la perspective de mécanismes temporels communs entre les différentes tâches de timing moteur explicite (e.g., TTS), et selon le postulat selon lequel l'IRT est un marqueur reflétant une partie de ces mécanismes, nous faisons l'hypothèse que l'IRT, extrait de la tâche d'écoute passive, prédit, les performances temporelles des tâches de reproduction impliquant aussi bien les mouvements du doigt que les mouvements de WBR, ainsi que les performances dans une tâche de synchronisation sans omission (D'Andrea-Penna et al., 2020). Considérant, dans le cadre de la TTS, que le mouvement est susceptible d'accélérer la vitesse d'accumulation (Sayali et al., 2018), nous avons formulé l'hypothèse d'une réduction de la variabilité temporelle et d'une sous-reproduction de chaque IC lors des mouvements de WBR comparés aux mouvements de doigt. Alternativement, en se basant sur la TTS et sur la suggestion que le type de mouvement puisse moduler l'attention (Kroger-Costa et al., 2013), nous avons prédit que, la compétition pour les ressources attentionnelles lors de la phase de reproduction serait accrue pour les mouvements de WBR comparativement aux mouvements de doigt, conduisant à une diminution du nombre d'impulsions accumulées et, par conséquent, à une sur-reproduction, quel que soit l'IC pour les mouvements de WBR par rapport aux mouvements de doigt. Dans une autre perspective et en accord avec le cadre de la CBI, nous avons émis l'hypothèse que les mouvements de WBR fourniraient un canal temporel supplémentaire, réduisant ainsi la variabilité dans la reproduction des intervalles temporels (De Kock et al., 2021).

3.3.1. Matériel et méthode

3.3.1.1. Participants

38 volontaires âgés de 19 à 29 ans (26 femmes et 12 hommes ; âge moyen : 22.8 ± 2.8 ans ; taille moyenne : 170.1 ± 10.1 cm) ont participé à l'étude. Tous les participants avaient une vision normale ou corrigée à la normale, une audition normale, étaient droitiers et n'avaient pas d'antécédents de troubles neurologiques, psychiatriques, moteurs ou perceptifs, ni de blessures

aux membres supérieurs ou inférieurs dans les six mois précédant la période d'évaluation. Le protocole expérimental a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche de l'Université de la Sarre (Sarrebruck, Allemagne). Tous les participants ont donné leur consentement éclairé par écrit, conformément à la Déclaration d'Helsinki, avant l'expérience. Les participants ont été indemnisés à hauteur de 12 € par heure pour une durée de participation moyenne comprise entre 2h et 2h30, ou ont reçu l'équivalent en « heures pour participation à des études », prérequis nécessaire pour la validation d'un module de leur cursus universitaire.

L'estimation de la taille de l'échantillon pour la corrélation de l'IRT avec les performances temporelles des tâches de timing moteur repose sur les résultats de D'Andrea-Penna et al. (2020). Les auteurs ont observé une corrélation significative entre l'IRT et la performance temporelle d'une tâche de synchronisation ($p < .001$) avec un effet de $\rho = .61$. Pour détecter un effet similaire avec une puissance de $1\text{-}ß = .90$, l'analyse à l'aide de l'outil G-Power (Faul et al., 2007) suggère une taille d'échantillon de 38 participants.

3.3.1.2. Dispositif expérimental et procédure

Dans cette étude, tous les participants ont réalisé l'ensemble des tâches dans l'ordre suivant : une tâche de synchronisation-continuation, une tâche d'écoute passive, une tâche de reproduction temporelle avec deux conditions contrebalancées (condition doigt (RT-Finger) vs WBR (RT-WBR)), et trois tâches contrôles (tapping au tempo naturel, WBR à vitesse naturelle (WBR-NAT) et WBR à vitesse maximale (WBR-Max)).

3.3.1.2.1. Tâche de synchronisation-continuation

Les participants ont effectué une tâche de synchronisation-continuation (voir Figure 20) basée sur un rythme isochrone. Lors de la phase de synchronisation, les individus devaient appuyer sur la touche espace de manière synchrone avec une séquence de bip isochrones séparés par un intervalle inter-onset (IIO) fixe de 600 ms durant une durée totale de 60 secondes. Cette

cadence est généralement considérée comme un rythme confortable (Repp, 2005). Les bips étaient diffusés par une enceinte (50 ms, ~60 dB) placée en dessous de l'écran. Après les 60 secondes, la séquence de bip cessait, marquant le début de la phase de continuation. Les participants devaient alors maintenir le rythme en appuyant successivement sur la touche espace, pendant une durée équivalente (60 secondes). Durant l'ensemble de la procédure, les participants étaient priés de fixer la croix de fixation au milieu de l'écran.

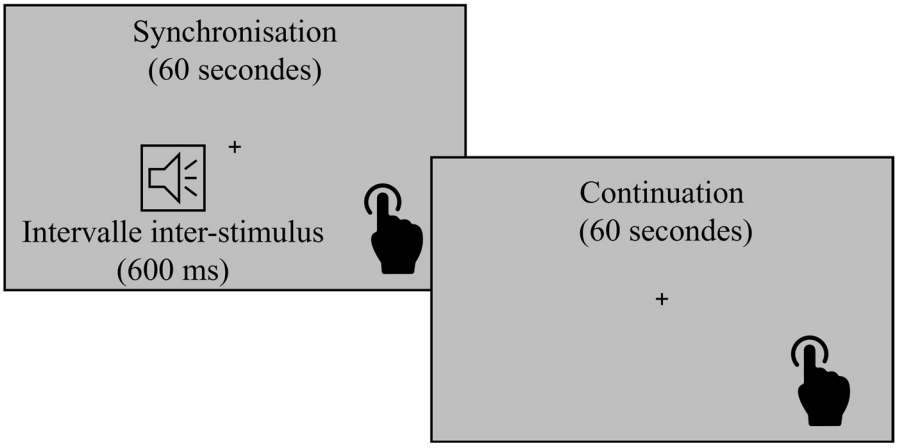


Figure 20 : Tâche de synchronisation-continuation

3.3.1.2.2. Tâche d'écoute passive

La tâche d'écoute passive d'un rythme a été réalisée selon deux conditions (voir Figure 21). Une condition longue consistant en une séquence isochrone avec un intervalle inter-stimulus (IIS) fixe de 800 ms, dans laquelle des essais comportaient un stimulus déviant (15 % de chance) présenté à mi-intervalle (i.e., à 400 ms). Une condition courte consistant en une séquence isochrone avec un IIS de 400 ms, dans laquelle des stimuli étaient omis de manière aléatoire (15 % de chance ; i.e., standard). Les participants étaient assis confortablement dans une chaise et devait se concentrer sur le rythme, pendant qu'il fixait la croix de fixation au milieu de l'écran.

Chaque condition a été présentée sous la forme de quatre blocs de 2 minutes, soit un total de huit blocs, dont l'ordre de présentation était aléatoire entre les participants. Une pause d'une durée maximale de 2 minutes était proposée entre chaque bloc.

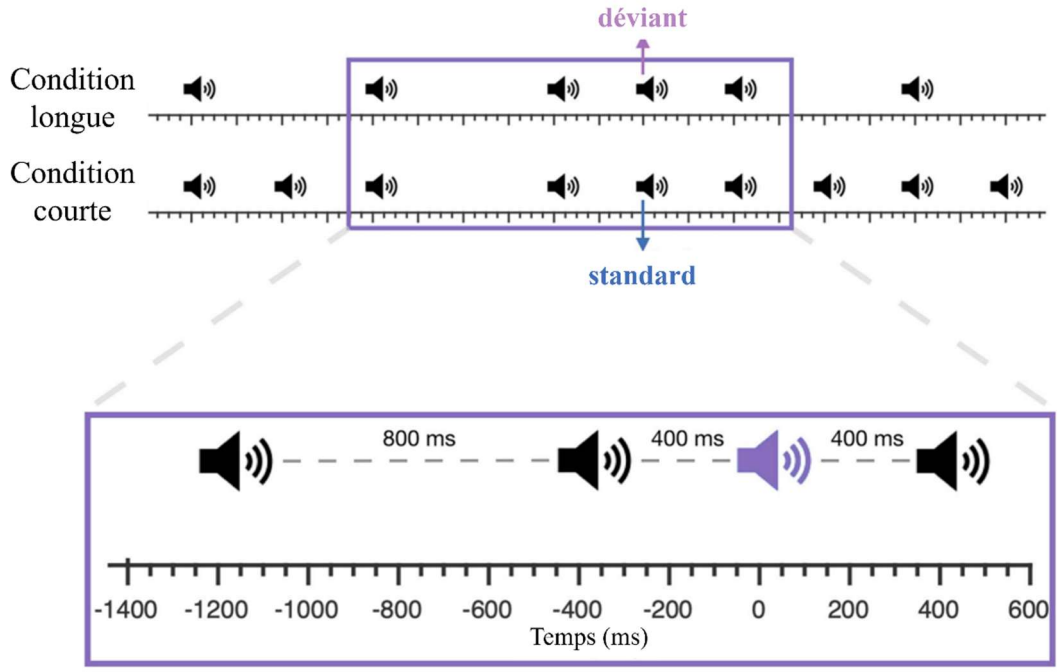


Figure 21 : Tâche d'écoute passive

Une présentation du paradigme d'écoute passive, durant laquelle les participants écoutent passivement des rythmes présentés selon les deux conditions. Cette configuration expérimentale permet de comparer les réponses cérébrales aux stimuli standards et déviants, pour des séquences auditives physiquement identiques dans les deux conditions, mais qui varient en fonction de l'attente temporelle du rythme. Figure adaptée de D'Andrea-Penna et al. (2020).

3.3.1.2.3. Tâche de reproduction temporelle

Pour la tâche de reproduction temporelle, trois IC ont été calculés sur la base d'une progression géométrique centrée sur la durée moyenne (M = 1200 ms), afin de couvrir une gamme de durées plus courtes et plus longues : courte ($C = M \times 1{,}2^{-3} = 900$ ms) et longue ($L = M \times 1{,}2^{3} = 1600$ ms). Ces IC sont communs à tous les participants, contrairement à la première

expérimentation décrite dans ce travail de thèse. Ils ont été utilisés pour la tâche de reproduction temporelle avec le mouvement du WBR et de doigt. L'ordre des deux conditions a été contrebalancé.

Chaque essai consistait en la présentation d'un IC suivi d'un IR (voir Figure 22). À la fin de l'IC, dans la condition WBR (i.e., RT-WBR), les participants initiaient l'IR dès qu'ils étaient prêts en appuyant le bouton sur leur cuisse avec leur index droit. Ensuite, ils devaient atteindre simultanément deux cibles placées en dessous avec leurs index (la cible droite servant de bouton), en essayant de faire correspondre la durée du mouvement d'atteinte (IR) avec le IC. Dans la condition doigt (i.e., RT-Finger), le même bouton que celui fixé sur la cuisse a été utilisé, mais cette fois-ci il était fixé sur la table face aux participants. Les participants initiaient l'IR dès qu'ils étaient prêts en appuyant le bouton une première fois. Ensuite, ils devaient réappuyer sur le bouton, en essayant de faire correspondre la durée d'atteinte avec l'IC. Le fait de presser les boutons induisait un son (i.e., clic lié au bouton d'environ 3 ms et 60 dB) qui marquait respectivement le début et la fin de l'IR. La durée inter-essai était randomisée entre 3500-4500 ms. Les participants ont reçu l'instruction de ne pas utiliser de stratégies de comptage. Ils ont d'abord effectué un bloc de familiarisation de six essais au cours duquel les 3 IC ont été présentés 2 fois dans un ordre aléatoire. Ensuite, ils ont effectué quatre blocs expérimentaux de 18 essais chacun, avec une pause maximale de 2 minutes entre les blocs. Chaque bloc comprenait 6 essais pour chaque IC, présentés de façon aléatoire, résultant en un total de 24 essais par IC par condition.

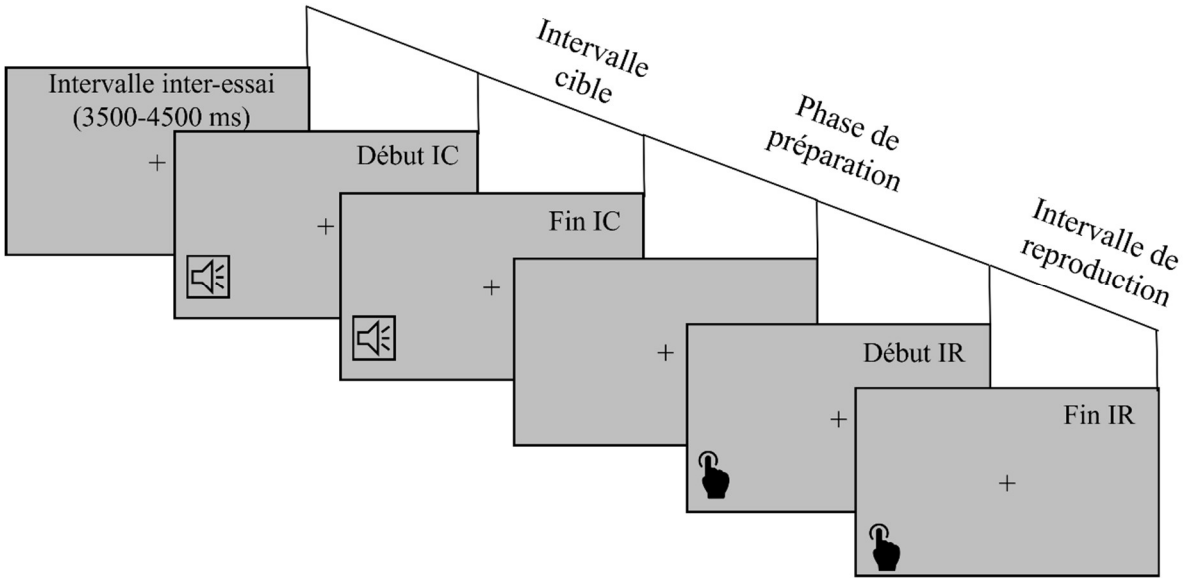


Figure 22 : Tâche de reproduction temporelle

3.3.1.2.4. Tâches contrôles

3.3.1.2.4.1. Tapping du doigt à un rythme naturel

Dans cette tâche, les participants devaient effectuer une série d'appuis sur la touche espace du clavier pendant 60 secondes, sans stimulus auditif ou visuel externe. Aucune consigne de cadence n'était donnée : ils étaient invités à appuyer à un rythme qui leur semblait naturel et confortable. Les participants étaient invités à fixer la croix de fixation au centre de l'écran tout au long de la tâche. Ils pouvaient ensuite prendre une pause pouvant aller jusqu'à 2 minutes avant de démarrer la tâche suivante. Le tempo spontané était en moyenne de 747 ± 250 ms (écart type).

3.3.1.2.4.2. Mouvement d'atteinte du corps entier à vitesse naturelle (WBR-NAT)

Chaque essai consistait à effectuer un mouvement de WBR à vitesse naturelle. Les participants commençaient le mouvement en appuyant sur le bouton sur leur cuisse avec leurs doigts. Ensuite, ils devaient atteindre simultanément deux cibles placées en contrebas avec leurs doigts à une vitesse naturelle, sans contrainte de temps. La cible de droite servait de bouton.

Les participants ont effectué 15 essais auto-initiés et successifs, suivi d'une pause pouvant aller jusqu'à 2 minutes avant de démarrer la tâche suivante. Le temps de mouvement naturel du WBR était en moyenne de 1690 ± 426 ms (écart type).

3.3.1.2.4.3. Mouvement d'atteinte du corps entier à vitesse maximale (WBR-Max)

A chaque essai, les participants commençaient le mouvement en appuyant sur le bouton sur leur cuisse avec leurs doigts. Ensuite, ils devaient atteindre simultanément deux cibles placées en dessous avec leurs doigts le plus vite possible. La cible de droite servait de bouton. Les participants ont effectué 15 essais auto-initiés et successifs, suivi d'une pause pouvant aller jusqu'à 2 minutes avant de démarrer la tâche suivante. Le temps de mouvement lors de WBR-Max était en moyenne de 500 ± 136 ms (écart type) et significativement inférieur aux temps de mouvement lors de la condition RT-WBR avec un IC de 900 ms (WBR-Max – RT-WBR-900 : $\beta = -495$, $p < .001$).

3.3.1.3. Collecte et traitement des données

Nous avons utilisé E-Prime pour la passation des différentes tâches, délivrer les stimuli, présenter les IC et collecter les IR. Tous les traitements des données de performance temporelle ont été effectués à l'aide de scripts personnalisés écrits en Python dans l'environnement Jupyter Notebook (version 7.3.2., Python 3). Pour collecter les données EEG, nous avons utilisé un EEG mobile (Smarting Pro 32, mBrainTrain).

3.3.1.3.1. Indice de réponse temporelle

L'indice de réponse temporelle a été extrait dans le cadre de la tâche d'écoute passive. Le prétraitement des données EEG a été réalisé à l'aide de MNE-Python (version 1.9.0 ; Python version 3.1). Dans un premier temps, les artéfacts musculaires, ont été identifiés visuellement et retirés du signal EEG brut. Un filtre Butterworth passe-bande de .01 à 30 Hz (ordre 4) a

ensuite été appliqué. Pour identifier et corriger les artéfacts oculaires et cardiaques, une analyse en composantes indépendantes (ICA) a été réalisée. Le signal a ensuite été re-référencé à la moyenne de l'ensemble des électrodes. Les epochs ont été corrigées par soustraction de la ligne de base calculée sur les 100 ms précédant l'apparition des stimuli déviants et standards (Luck et al., 2014). Les segments contenant des amplitudes absolues supérieures à ± 120 microvolts ont été automatiquement rejetés (Damsma et al., 2021). Enfin, les segments restants ont été inspectés manuellement afin de détecter d'éventuels artéfacts résiduels (e.g., artéfacts de mouvement). Les ensembles de données comportant moins de 10 essais exempts d'artéfacts par condition ont été exclus.

L'IRT a été calculé à partir des composantes N1 et P2 extraites de l'électrode Cz pour les deux stimuli (i.e., déviant et standard) de la tâche d'écoute passive, conformément à la méthode d'Andrea-Penna et al. (2020). Le signal EEG continu a été segmenté en fenêtres allant de -100 à 400 ms autour de l'apparition du son. Étant donné les différences de latence attendues entre les conditions (D'Andrea-Penna et al., 2020), des fenêtres temporelles distinctes ont été définies pour chaque type d'événement. Plus précisément, ces fenêtres ont été déterminées comme étant de ± 50 ms autour du pic moyen issu de la moyenne générale de l'ensemble des participants pour chaque stimuli (D'Andrea-Penna et al., 2020). Les valeurs moyennes d'amplitude des composantes N1 et P2 ont été ensuite extraites pour chaque participant. L'amplitude N1–P2 a été calculée en soustrayant l'amplitude moyenne de la N1 de celle de la P2, séparément pour chaque stimuli (i.e., déviant et standard). Enfin, la différence d'amplitude N1–P2 entre déviants et standards (i.e., IRT) a été utilisée pour les analyses.

3.3.1.3.2. Performances en synchronisation temporelle

Pour les phases de synchronisation, et afin de prendre en compte les frappes occasionnellement mal synchronisées, seules les réponses survenant dans une fenêtre de ±½ de

l'intervalle inter-onset (IOI) autour de chaque battement du métronome ont été retenues pour les analyses ultérieures (Tomyta et al., 2023). La frappe la plus proche dans cette fenêtre a été associée au battement correspondant du métronome ; les frappes en dehors de cette plage ont été exclues. La précision moyenne a été calculée selon la formule suivante (Lewis et al., 2004) :

Précision moyenne = [(1 – ((début attendu – début produit) / début attendu)) × 100]

Équation 5 : Calcul de la précision moyenne pour une tache de synchronisation

De plus, nous avons calculé le coefficient de variation des erreurs absolues de synchronisation (CVSE) à partir de la moyenne et de l'écart type des erreurs de synchronisation. L'erreur de synchronisation est définie comme la différence temporelle absolue entre chaque frappe et le battement du métronome correspondant (Tomyta et al., 2023) :

Erreur de synchronisation (n) = |début de frappe (n) – début du métronome (n)|

Équation 6 : Calcul des erreurs absolues de synchronisation

$$\text{CVSE} = \frac{\text{Ecart type d'erreur de synchronisation}}{\text{Moyenne d'erreur de synchronisation}}$$

Équation 7 : Calcul du coefficient de variation des erreurs absolues de synchronisation

3.3.1.3.3. Performances en reproduction temporelle

Les essais issus de la tâche de reproduction pour lesquels l'IR était supérieur au double de l'IC (n=35 ; <1% de l'ensemble des essais) ont été exclus de l'ensemble des analyses (Bueno et al., 2024; Gümüş & Balcı, 2023; Spapé et al., 2023). Dans la tâche de reproduction, la précision temporelle a été calculée pour chaque essai, mouvement, durée et participant, en utilisant le ratio IR/IC, défini comme le rapport entre l'intervalle de reproduction (IR, i.e.,

différence temporelle entre le début et la fin de la reproduction) et l'intervalle cible (IC, i.e., durée entre les deux sons indiquant l'intervalle à reproduire).

La variabilité temporelle a été quantifiée par le CV. Étant donné que le CV ne peut être calculé sur un seul essai, et afin d'utiliser des LMM, le CV a été calculé pour chaque condition de Mouvement, Durée et participant à partir de 6 essais consécutifs, formant 4 blocs au maximum (Monfort et al., 2022).

3.3.1.4. Analyses statistiques

3.3.1.4.1. Capacité prédictive de l'IRT

Similairement à D'Andrea-Penna et al. (2020), afin de déterminer si l'IRT est corrélé aux performances temporelles dans les tâches de reproduction, nous avons appliqué une corrélation de Pearson (corrélation de Spearman si l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée) entre l'IRT et l'exactitude temporelle (ratio IR/IC) pour chaque durée et chaque mouvement, ainsi qu'entre l'IRT et la variabilité temporelle (CV) pour chaque durée et chaque mouvement. De plus, pour tester si l'IRT est corrélé aux performances temporelles dans la tâche de synchronisation, nous avons appliqué une corrélation de Pearson (corrélation de Spearman si l'hypothèse de normalité n'est pas vérifiée) entre l'IRT et l'exactitude temporelle (précision moyenne), ainsi qu'entre l'IRT et la variabilité temporelle (CVSE).

3.3.1.4.2. Reproduction temporelle en fonction du mouvement

Nous avons utilisé un LMM pour quantifier les différences de performances temporelles lors de la tâche de reproduction temporelle (précision : ratio IR/IC ; variabilité : CV) en fonction du Mouvement (Mouvement : « Doigt » vs « WBR »), de Durée (Durée : « 900 », « 1200 », « 1600 ») et de l'interaction Mouvement x Durée. Le LMM a été réalisé avec JAMOVI 2.6.26 (The jamovi project (2022)) [logiciel informatique]. Disponible sur : https://www.jamovi.org. GAMLj3 : General analyses for linear models version 3. [Module jamovi]. Disponible sur :

https://gamlj.github.io/. Les termes du modèle ont été imbriqués selon la méthode de Satterthwaite. Les effets fixes ont été codés en variable « simple » (*simple coding* en anglais). Les participants ont été inclus en tant qu'effet aléatoire sur l'ordonnée à l'origine (De Kock et al., 2023; Monfort et al., 2022). Lorsqu'un effet significatif était observé, une taille d'effet de type d a été calculée en divisant le coefficient de régression non standardisé par l'écart-type résiduel (Rouder et al., 2012). Lorsqu'une interaction significative a été trouvée, des analyses à effets simples ont été effectuées.

3.3.2. Résultats

3.3.2.1. IRT

Pour déterminer si les stimuli déviants (i.e., condition longue) induisent une composante N1-P2 plus marquée que les stimuli standards (i.e., condition courte), nous avons analysé l'amplitude de la N1-P2 pour ces deux types de stimuli. Conformément à la théorie de l'attention dynamique (Jones & Boltz, 1989), au principe d'adaptabilité neuronale (Schafer, 1982) et aux résultats de D'Andrea-Penna et al. (2020), l'analyse par GLM révèle une différence significative ($p < .001$), indiquant que l'amplitude de la N1-P2 aux déviants ($M = 3.63 \pm 0.98$) était supérieure à celle observée pour les standards ($M = 0.39 \pm 0.12$) (voir Figure 23).

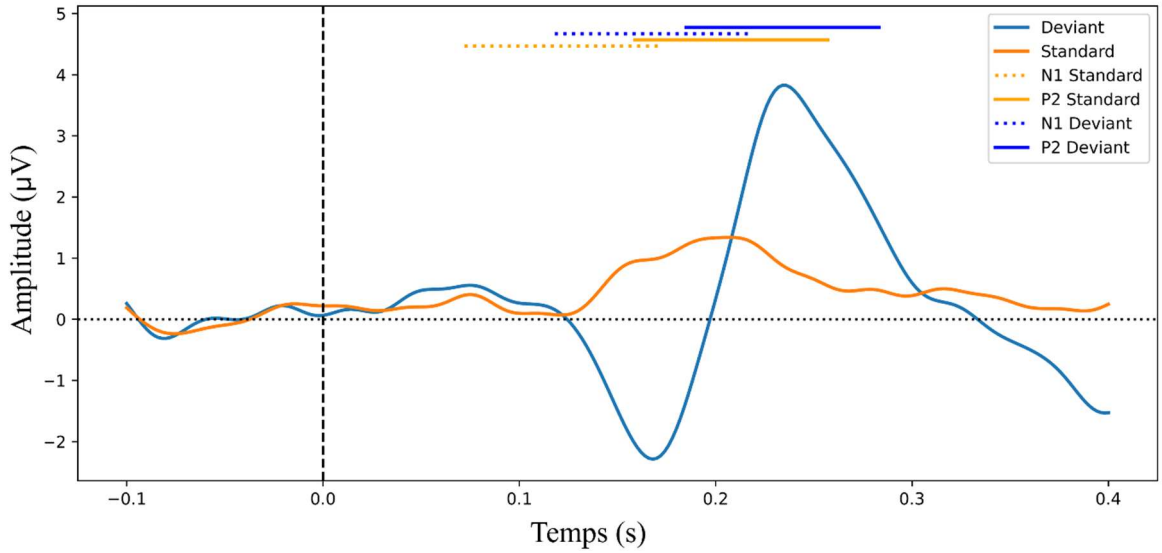


Figure 23 : N1 et P2 moyen des stimuli déviants et standards à Cz

Les potentiels évoqués, moyennés sur l'ensemble des participants (« déviant » en bleu = stimulus déviant dans la condition « longue » ; « standard » en orange = stimulus standard dans la condition « courte »), montrent que le complexe N1-P2 est significativement plus ample pour les stimuli déviants que pour les standards. Les lignes horizontales en haut de la figure indiquent les fenêtres temporelles utilisées pour le calcul des amplitudes moyennes (tirets bleus pour le stimuli déviant (i.e., condition longue) ; tirets orange pour le stimuli standard (i.e., condition courte) ; trait plein pour P2 ; trait en pointillée pour N1).

3.3.2.2. Capacité prédictive de l'IRT

L'analyse pour établir la prédiction de l'IRT pour les performances temporelles d'une tâche de reproduction ne révèle aucune relation significative pour aucune Durée et type de Mouvement (voir Tableau 7 et 8). Une analyse complémentaire a été effectuée avec un modèle LMM. Cette approche permet de prendre en compte la structure hiérarchique des données et l'accès aux mesures au niveau de l'essai pour la tâche de reproduction temporelle. Les analyses convergent avec celles de la corrélation, ne montrant aucun effet significatif (voir Annexe 2).

Mouvement	Durée (ms)	Test normalité	Test de corrélation		
		Shapiro-Wilk	Test	r de Pearson	p
WBR	**900**	.266	Pearson	-.315	.054
WBR	**1200**	.660	Pearson	.014	.934
WBR	**1600**	.191	Pearson	.147	.378
Doigt	**900**	.125	Pearson	-.145	.385
Doigt	**1200**	.303	Pearson	-.008	.961
Doigt	**1600**	.171	Pearson	-.01	.952

Tableau 7 : Corrélation entre l'IRT et le CV d'une tâche de reproduction temporelle

Corrélations entre l'indice de réponse temporelle (IRT) et la variabilité temporelle (coefficient de variation (CV)) pour chaque condition expérimentale lors de la tâche de reproduction temporelle. Le tableau comprend, pour chaque durée (900, 1200 et 1600 ms) et chaque type de mouvement (mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) et doigt), le test de normalité avec sa valeur p, le type de corrélation sélectionné, la valeur du coefficient (r ou ρ), ainsi que la significativité associée.

Mouvement	Durée (ms)	Test normalité	Test de corrélation		
		Shapiro-Wilk	Test	r de Pearson rhô de Spearman	p
WBR	**900**	.322	Pearson	-.062	.713
WBR	**1200**	.110	Pearson	-.37	.824
WBR	**1600**	.287	Pearson	.112	.502
Doigt	**900**	.087	Pearson	-.161	.334
Doigt	**1200**	**.030**	Spearman	-.011	.948
Doigt	**1600**	**.028**	Spearman	.126	.449

Tableau 8 : Corrélation entre le l'IRT et le ratio IR/IC d'une tâche de reproduction temporelle

Corrélations entre l'indice de réponse temporelle (IRT) et la précision temporelle (ratio IR/IC) pour chaque condition expérimentale lors de la tâche de reproduction temporelle. Le tableau comprend, pour chaque durée (900, 1200 et 1600 ms) et chaque type de mouvement (mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) et doigt), le test de normalité avec sa valeur p, le type de corrélation sélectionné, la valeur du coefficient (r ou ρ), ainsi que la significativité associée.

Pour la tâche de synchronisation, nous n'observons aucune relation significative entre l'IRT et la précision temporelle (rhô Spearman = .205, p = .215), ni pour la variabilité temporelle (r Pearson = .088, p = .6). Une analyse complémentaire, en utilisant la même variable dépendante calculée par D'Andrea-Penna et al. (2020), ne révèle également aucune relation significative entre l'IRT et le vecteur de force (rhô Spearman = .138, p = .407).

3.3.2.3. Reproduction temporelle en fonction du mouvement

L'analyse descriptive de la précision temporelle (i.e., ratio IR/IC) est résumée dans le Tableau 9 et illustrée dans la Figure 24B. L'analyse LMM a révélé un effet principal significatif de la Durée sur le ratio IR/IC (p = .016 ; 1200-900 : β = -.008, p = .172 ; 1600-900 : β = -.0596, p < .001, d = -0.3), et du Mouvement sur le ratio IR/IC (RT-WBR - RT-Finger : β = -.012, p = .016, d = .06). On observe également une interaction Durée × Mouvement significative (p < .001). Les analyses des effets simples de cette interaction ont révélé pour 900 ms une sur-reproduction significative en condition RT-WBR par rapport à RT-Finger (RT-WBR - RT-Finger : β = .07, p < .001), ainsi qu'une sous-reproduction significative en condition RT-WBR par rapport à RT-Finger (RT-WBR - RT-Finger : β = -.03, p < .001) pour 1600 ms. Nous n'observons aucune différence significative pour 1200 ms (RT-WBR - RT-Finger : β = -.002, p = .759).

L'analyse descriptive de la variabilité temporelle (i.e., CV) est résumée dans le Tableau 9 et illustrée dans la Figure 24A. L'analyse LMM a révélé un effet significatif du Mouvement sur le CV (RT-WBR - RT-Finger : β = -.016, p < .001, d = .31). Nous n'observons aucun effet significatif de la Durée sur le CV (Durée : p = .335), ni d'interaction Mouvement * Durée (p = .12).

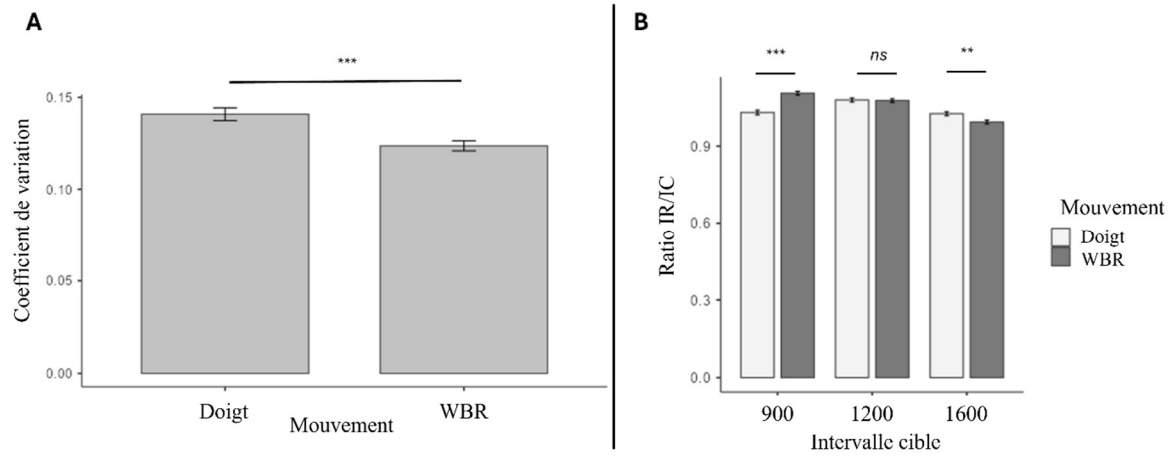


Figure 24 : Précision temporelle et variabilité entre les durées et les mouvements.

***A** Visualisation de la variabilité temporelle moyenne (coefficient de variation ± SE) pour chaque mouvement et durée pendant la tâche de reproduction. **B** Visualisation de la précision temporelle moyenne (ratio IR/IC ± SE) pour chaque mouvement (Whole-Body Reaching (WBR) vs. Doigt) et durée (900, 1200, 1600) pendant la tâche de reproduction. La significativité statistique est indiquée comme suit : ns = non significatif ; ** p < .01 ; *** p < .001.*

	Durée	**Mouvement**	**Moyenne**	**Erreur standard**	**95% Intervalle de confiance**	
					Inférieur	**Supérieure**
Ratio IR/IC	**900**	**Doigt**	1.031	0.00898	1.013	1.049
		WBR	1.106	0.00744	1.091	1.121
	1200	**Doigt**	1.08	0.00796	1.064	1.095
		WBR	1.077	0.00712	1.063	1.091
	1600	**Doigt**	1.026	0.00784	1.011	1.042
		WBR	0.994	0.00729	0.98	1.008
Coefficient de variation	**900**	**Doigt**	0.149	0.0062	0.136	0.161
		WBR	0.121	0.00463	0.112	0.13
	1200	**Doigt**	0.135	0.00603	0.124	0.147
		WBR	0.121	0.00451	0.112	0.13
	1600	**Doigt**	0.139	0.00583	0.127	0.15
		WBR	0.129	0.005	0.119	0.139

Tableau 9 : Analyse descriptive de la précision et variabilité temporelle en fonction de la durée et du mouvement

Le ratio IR/IC moyen ± SE (erreur standard) et le coefficient de variation moyen ± SE avec des intervalles de confiance à 95 % pour chaque durée et chaque type de mouvement (mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) et doigt).

3.3.3. Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'examiner dans quelle mesure l'IRT prédit les performances temporelles dans une tâche de reproduction temporelle en fonction du mouvement et une tâche de synchronisation. La corrélation de l'IRT avec les performances temporelles, que ce soit dans la tâche de reproduction ou de synchronisation, ne s'est pas révélée significative. Le second objectif était d'analyser la précision et la variabilité temporelle lors d'une tâche de reproduction en fonction du type de mouvement. De manière générale, on observe une réduction de la variabilité temporelle pour un mouvement de WBR par rapport à un mouvement du doigt. L'interaction entre la durée et le mouvement révèle aucune différence de précision entre les deux types de mouvement pour 1200 ms, tandis qu'on observe pour 900 ms une sur-reproduction du WBR, par rapport au doigt, et une sous-reproduction du WBR par rapport au doigt pour 1600 ms. On observe uniquement un effet de tendance centrale pour le mouvement de WBR par rapport au mouvement de doigt.

3.3.3.1. Capacité prédictive de l'IRT

D'Andrea-Penna et al. (2020) ont interprété la N1-P2 comme une expression d'un mécanisme d'actualisation perceptive impliquant attention et apprentissage suivant la détection d'un événement inattendu temporellement, et ont suggéré qu'il pourrait constituer un marqueur généralisé du traitement temporel. Nos résultats amènent à nuancer cette interprétation. Selon les auteurs, la différence de magnitude entre les corrélats N1-P2 issus des stimuli déviants et standards (i.e., IRT) reflètent la détection de violations d'un rythme. Dans notre étude, toutefois, l'absence de corrélation de l'IRT avec des performances temporelles indique que ce marqueur

neuronal n'est pas généralisable à d'autres tâches de timing moteur. Sa valeur prédictive des performances sensorimotrices est plus nuancée que ce qui avait été initialement proposé. A noter que notre tâche de synchronisation diffère légèrement de celle utilisée par D'Andrea-Penna et al. (2020). Dans leur étude, les participants devaient maintenir la synchronisation malgré l'omission d'un battement dans 15 % des essais, introduisant ainsi un aspect « oddball » analogue à celui des tâches d'écoute passive. Dans notre protocole, la tâche de synchronisation ne comportait pas cette composante déviante. Ce constat conduit à envisager que l'IRT constitue un indicateur spécifique des processus engagés dans les paradigmes de type « oddball temporel », et qu'il ne saurait être un marqueur du traitement de la durée généralisable à des tâches de synchronisation ou de reproduction dépourvues de cette caractéristique. Cette interprétation rejoint des travaux montrant, d'une part, que différents marqueurs électrophysiologiques du traitement temporel renvoient à des systèmes fonctionnellement distincts, certains étant plus étroitement associés à des processus décisionnels tardifs, comme la LPCt et la P300 (Kelly & O'Connell, 2013; Polich & Kok, 1995), alors que la composante N1-P2 est plus probablement liée à des mécanismes perceptifs précoces d'encodage prédictif des régularités temporelles (Kononowicz et al., 2017; Kononowicz & van Rijn, 2014; van Wassenhove & Lecoutre, 2015). D'autre part, elle s'inscrit dans une littérature plus large soulignant que la performance en matière de timing ne peut être étudiée comme un simple processus se contentant de mesurer le temps, mais doit être appréhendée comme le résultat d'un processus décisionnel complexe dans lequel, outre un système d'horloge, de nombreux autres mécanismes cognitifs jouent un rôle déterminant (Kononowicz et al., 2017; Taatgen et al., 2007; Taatgen & van Rijn, 2011; van Rijn & Taatgen, 2008), et où les jugements de durée dépendent également du contexte (e.g., des propriétés non temporelles des stimuli et des caractéristiques de la tâche ; Matthews & Meck, 2014). Dans ce cadre, la N1-P2 et l'IRT refléteraient un mécanisme spécialisé dans la détection et l'actualisation des irrégularités rythmiques dans des

contextes de type « oddball temporel », plutôt qu'un indice généralisable à de nombreuses tâches de traitement de l'information temporelle.

Bien que nous nous sommes intéressés en particulier à l'IRT proposé par D'Andrea-Penna et al. (2020), d'autres potentiels évoqués et oscillations existent. L'étude de ces autres potentiels évoqués constitue une approche pertinente pour étudier les mécanismes du traitement temporel dans leur diversité. Ainsi, des études futures pourrait s'intéresser à examiner d'autres potentiels marqueurs du traitement temporel survenant avant, pendant ou après l'intervalle à estimer (Kononowicz et al., 2017). Parmi ceux-ci figurent par exemple la composante positive tardive du timing (LPCt ; *Late Positive Component of Timing* en anglais), la CNV, ainsi que les bandes Mu et Bêta. Toutefois, les mécanismes reflétés par ces différents marqueurs font encore l'objet de débats, et les résultats disponibles restent mixtes. Par exemple, la CNV a été initialement proposée comme le corrélat neurophysiologique reflétant l'activité de l'accumulateur de l'horloge interne (Macar et al., 1999), mais cette interprétation a été nuancée par des travaux ultérieurs (e.g., Kononowicz & Penney, 2016; Kononowicz & van Rijn, 2011), suggérant notamment que la CNV refléterait davantage des processus anticipatoires et de préparation, plutôt qu'un mécanisme d'accumulation (e.g., Kononowicz et al., 2015; McCone et al., 2023). Des travaux futurs pourraient s'attacher à identifier les différents marqueurs du traitement temporel dans le cadre de divers types de mouvements, afin de déterminer dans quelle mesure ils sont généralisables à différents contextes moteurs (e.g., reproduction avec un mouvement de doigt versus WBR) et d'identifier d'éventuels marqueurs ou mécanismes temporels communs sous-tendant ces tâches.

3.3.3.2. Reproduction temporelle en fonction du mouvement

La diminution de la variabilité observée pour les mouvements de WBR converge avec des travaux montrant que les mouvements actifs améliorent la précision temporelle par rapport

aux conditions passives ou sans mouvement (De Kock et al., 2023 ; Wiener et al., 2019), en accord également avec notre première étude. Elle s'inscrit dans le cadre de la CBI, selon lequel les informations temporelles issues de plusieurs canaux, notamment auditif et sensorimoteur, sont intégrées en fonction de leur fiabilité, conduisant à des estimations plus précises que chaque modalité prise isolément (Alais & Burr, 2019 ; De Kock et al., 2023). De manière similaire, nos résultats suggèrent que les mouvements de WBR durant la phase de décodage pourraient fournir des indices sensorimoteurs plus fiables que les mouvements discrets du doigt, réduisant ainsi la variabilité temporelle globale. La réduction de la variabilité temporelle observée lors des mouvements de WBR est également cohérente avec notre hypothèse selon laquelle le mouvement accélère l'accumulateur. Comme nous l'avons déjà évoqué dans la première étude, ni la CBI, ni la TTS ne permet pas de rendre compte de l'absence de différence concernant la précision temporelle entre les deux mouvements pour une durée moyenne (1200 ms) et des différences observées entre les mouvements de WBR et de doigt pour les durées de 900 et 1600 ms. Deux hypothèses non exclusives peuvent être avancées pour expliquer la sur-reproduction des durées courtes en WBR. Premièrement, des vitesses de mouvement plus élevées pourraient comprimer la durée subjective, conduisant à une sous-estimation du temps écoulé, en cohérence avec les effets de paramètres moteurs tels que la direction, la vitesse ou le contexte sur la perception temporelle (De Kock et al., 2023; Tomassini & Morrone, 2016; Yokosaka et al., 2015; Yon et al., 2017). Deuxièmement, cette sur-reproduction pourrait refléter un compromis vitesse–précision propre aux mouvements rapides en WBR, les participants privilégiant le maintien de l'équilibre et la précision spatiale au détriment de la précision temporelle lorsque les contraintes biomécaniques augmentent (Schmidt et al., 1979). Toutefois, ces explications ne rendent pas compte de la non-différence entre les deux mouvements pour une durée moyenne et de la sous-reproduction du WBR par rapport au doigt pour la durée longue. De plus, on observe uniquement un effet de tendance centrale pour le mouvement de

WBR par rapport au mouvement de doigt. Le fait que cet effet n'apparaisse pas pour les mouvements du doigt n'est pas attendu et demeure difficile à interpréter. L'absence ou la réduction de l'effet de la tendance centrale ont déjà été rapportés (e.g., Glasauer & Shi, 2021; Lejeune & Wearden, 2009; Mitani & Kashino, 2016) et expliqués par des effets d'ordre ou de contexte séquentiel par exemple. Toutefois, cette explication ne s'applique pas à notre protocole, dans lequel la présentation des IC était aléatoire. Par ailleurs, les valeurs extrêmes ayant été exclues de nos analyses, elles ne peuvent donc pas contribuer à cette absence d'effet de tendance centrale.

Malgré les résultats apportés par notre étude concernant l'interaction mouvement-jugement temporel, certaines limites doivent être reconnues, similairement à l'étude 1. Alors que notre paradigme comparait des mouvements de WBR et des mouvements du doigt différant en amplitude, vitesse et type de mouvement (WBR et doigt), de futurs protocoles pourraient systématiquement manipuler ces facteurs (De Kock, Gladhill, et al., 2021). De plus, nos interprétations proposées ici, en lien avec la TTS, la CBI, et les mécanismes attentionnels, nécessitent des recherches futures pour valider ces hypothèses.

3.3.4. Conclusion

La présente étude suggère que l'IRT n'est pas un marqueur du jugement temporel généralisable à diverses tâches de timing moteur, mais plutôt pour un contexte particulier. Parallèlement, les résultats de reproduction temporelle confirment ceux de l'étude 1 : les mouvements de WBR s'accompagnent d'une variabilité temporelle réduite par rapport aux mouvements du doigt, effet compatible avec la CBI ou avec l'hypothèse d'une accélération de l'oscillateur dans la TTS. Toutefois, en WBR, la sur-reproduction de la durée courte et la sous-reproduction de la durée longue ne s'expliquent ni par la CBI ni par la TTS. Deux hypothèses peuvent être envisagées : une compression de la durée subjective induite par des vitesses de

mouvement plus élevées pour les durées courtes, et une réévaluation des objectifs temporels sous l'effet des contraintes biomécaniques propres aux mouvements de tout le corps. De manière générale, nos résultats s'inscrivent dans un ensemble croissant de travaux démontrant l'interaction étroite entre mouvement et perception du temps (Balasubramaniam et al., 2021; De Kock et al., 2021).

Chapitre 4 : Discussion Générale

« Years teach much which the days never knew » Ralph Waldo Emerson

4.1. Rappel des objectifs

Dans notre vie quotidienne, l'estimation du temps se manifeste souvent à travers des actions motrices. Lorsqu'un piéton souhaite traverser la rue, il évalue le temps disponible avant l'arrivée d'un véhicule pour décider du moment d'initiation de la marche ou de sa vitesse de marche. Ce lien entre timing et mouvement apparait d'autant plus de manière évidente dans le domaine clinique, comme la rééducation de la marche des patients atteints de la MP, où des signaux auditifs rythmiques (e.g., métronome) améliorent la qualité de la marche (Bella et al., 2017; Benoit et al., 2014). Ce lien est supporté par des études en neuroimagerie, montrant des régions cérébrales communes au mouvement et à la perception du temps (Chen et al., 2008; Coull et al., 2011, 2016; Gordon et al., 2018; Grahn & Brett, 2007; Ross et al., 2018; Wiener et al., 2010a). Toutefois, l'étude de l'interaction entre le mouvement et la perception du temps a été peu étudiée jusqu'à récemment (pour revue De Kock et al., 2021). Ainsi, les travaux récents démontrent une relation réciproque avec le mouvement modifiant la perception du temps d'une part, et les capacités du jugement temporel prédisant les capacités sensorimotrices (e.g., D'Andrea-Penna et al., 2020; De Kock et al., 2023; Wiener et al., 2019; Yokosaka et al., 2015). Malgré les avancées réalisées dans le champ de la perception du temps, les recherches antérieures se sont principalement basées sur des mouvements discrets à une seule articulation, comme appuyer sur un bouton avec un doigt. En contrepartie, les mouvements polyarticulaires (i.e., impliquant l'ensemble du corps), qui sont plus écologiquement valables dans les contextes quotidiens (e.g.,, ramasser un objet au sol), ont reçu relativement peu d'attention (De Kock et al., 2021; Fautrelle et al., 2015; Gavazzi et al., 2013). Par ailleurs, dans le champ du contrôle moteur de nombreuses études ont démontré que l'organisation motrice varie en fonction des contraintes spatiales, alors que très peu se sont intéressées à l'influence d'objectif temporel explicite sur l'organisation motrice, en dehors des modifications de vitesse. Ainsi, nous en savons peu sur l'organisation motrice et les capacités à effectuer des mouvements de WBR en

fonction d'un intervalle de temps spécifique. De plus, les modèles actuels concernant le contrôle moteur des mouvements d'atteintes n'intègrent pas cette dimension temporelle. L'objectif général de cette thèse est donc d'examiner l'interaction entre le mouvement de type WBR et la perception du temps, et d'étudier comment l'intégration d'un objectif temporel explicite influence l'organisation motrice d'un mouvement de WBR.

Ce travail de thèse s'articule autour de quatre objectifs principaux. Premièrement, nous souhaitions examiner les différences de performances lors d'une tâche de reproduction temporelle avec des mouvements de WBR par rapport à un mouvement de doigt. Deuxièmement, nous souhaitions identifier les différences dans les stratégies motrices entre les mouvements de WBR avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement identique. Nous avions prédit des différences dans la phase de préparation et d'exécution du mouvement entre les mouvements de WBR avec et sans objectif temporel, pour une durée de mouvement équivalente. Troisièmement, nous avons analysé les stratégies motrices lors de la tâche de reproduction temporelle avec un mouvement de WBR selon la durée de l'objectif temporel. Nous souhaitions également identifier les stratégies motrices associés à une meilleure capacité de régulation d'un mouvement de WBR contraint temporellement. Finalement, nous souhaitions déterminer si la capacité de perception temporelle, reflétée par le marqueur IRT, prédit les performances temporelles de différentes tâches de timing moteur : une tâche de reproduction temporelle et une tâche de synchronisation. Si tel était le cas, cet indicateur pourrait constituer un indicateur général des performances temporelles.

4.2. Perception du temps et mouvement

Nos deux expérimentations convergent sur un même profil de performance temporelle. Premièrement, la variabilité temporelle est systématiquement plus faible lors des mouvements de WBR que lors des mouvements de doigt, ce qui indique une amélioration de la précision

temporelle associée au mouvement de WBR. Deuxièmement, les reproductions présentent un fort effet de tendance centrale, avec une sur-reproduction des durées courtes et une sous-reproduction des durées longues uniquement pour les mouvements de WBR (Vierordt, 1868).

Dans le cadre de la TTS, la réduction de la variabilité temporelle en WBR par rapport au doigt est compatible avec l'hypothèse d'une modulation de l'oscillateur de l'horloge interne. Une accélération du rythme de l'oscillateur, comme celle classiquement attribuée à une augmentation de la transmission dopaminergique dans les circuits striato-thalamo-corticaux, conduit à une augmentation du nombre d'impulsions accumulées par unité de temps et, en conséquence, à une meilleure résolution temporelle relative (Buhusi & Meck, 2005). Cette interprétation est cohérente avec les travaux montrant que des manipulations pharmacologiques dopaminergiques ou des états motivationnels associés à la dopamine produisent une réduction de la variabilité des jugements d'intervalle et simultanément un allongement du temps subjectif (Buhusi & Meck, 2005). Cependant, cet allongement devrait se traduire par une sous-reproduction de l'ensemble des durées, ce que nous n'observons pas dans nos études. De façon générale nous observons une sur-reproduction pour les durées courtes et une sous-reproduction pour les durées longues en WBR par rapport au mouvement du doigt. Trois hypothèses alternatives peuvent être avancées.

Dans le cadre de la TTS et de la porte attentionnelle, on peut postuler une concurrence attentionnelle entre la tâche motrice et la tâche de reproduction temporelle (Zakay & Block, 1995). Selon ce cadre, les mouvements de WBR nécessiterait davantage de ressources attentionnelles pendant la phase de reproduction que les mouvements de doigt, ce qui réduirait le temps effectif pendant lequel la porte est ouverte et le flux d'impulsions est accumulé (Kroger-Costa et al., 2013). Cette réduction conduirait à des représentations plus courtes et plus variables des intervalles, comme observé dans les paradigmes de double tâche classiques (Brown, 1997, 2008; Hemmes et al., 2004; Kladopoulos et al., 2004; Zakay & Block, 1995), se

traduisant dans notre cas par une sur-reproduction de l'intervalle reproduit pour chacune des durées. Or, nos données montrent l'inverse lors de la reproduction de durées moyennes et plus longues. De plus, la sur-reproduction observée pour les durées courtes en condition WBR, commune aux deux études, n'est pas accompagnée d'une augmentation concomitante de la variabilité temporelle pour ces durées par rapport aux autres, contrairement à ce que l'on pourrait s'attendre. De ce fait, cette hypothèse ne semble pas pouvoir expliquer les différences entre les deux types de mouvement.

La sur-reproduction temporelle observée en WBR pour des durées courtes peut s'expliquer par des facteurs moteurs, de manière non-exclusive avec les hypothèses de la TTS. D'une part, plusieurs travaux montrent que la vitesse du mouvement module la perception du temps, des mouvements rapides pouvant comprimer les intervalles perçus et conduire à une sous-estimation subjective, ce qui, dans notre tâche, pourrait se traduire par une sur-reproduction des durées très courtes lorsque les vitesses en WBR sont élevées (De Kock et al., 2023 ; Tomassini & Morrone, 2016 ; Yokosaka et al., 2015 ; Yon et al., 2017). D'autre part, dans le cadre du compromis vitesse–précision (Schmidt et al., 1979), les fortes contraintes biomécaniques et posturales propres aux mouvements de tout le corps peuvent amener les participants à privilégier la précision spatiale et le maintien de l'équilibre au détriment de la précision temporelle, ce qui biaiserait l'estimation vers une durée compatible avec une vitesse de mouvement plus « naturelle », sans nécessairement augmenter la variabilité. Toutefois, ces deux explications en lien avec les facteurs moteurs rendent uniquement compte de la sur-reproduction pour des durées courtes, mais pas de la sous-reproduction des durées longues en WBR par rapport au doigt.

De nombreux travaux montrent la labilité du jugement temporel, avec des performances fortement dépendantes du contexte et des caractéristiques de la tâche (pour revue Matthews & Meck, 2014). Nos deux expérimentations différaient sur plusieurs aspects essentiels. Toutefois,

nous observons des résultats similaires concernant la tendance centrale et la réduction de la variabilité temporelle en WBR par rapport au doigt. Premièrement, dans la première expérimentation, cinq IC individualisés étaient utilisés, chacun répété au sein d'un même bloc, alors que dans la seconde, trois IC communs étaient présentés à tous les participants et randomisés au sein d'un même bloc. Par ailleurs, dans la première les durées étaient individualisées et centrées sur la durée naturelle du mouvement de WBR, tandis que dans la seconde, les durées étaient communes à l'ensemble des participants. La convergence des résultats indique que l'effet sur la tendance centrale et la réduction de la variabilité temporelle en WBR ne dépend pas de ces différents facteurs. La présentation répétée d'un seul IC dans la première étude pourrait, en principe, favoriser un effet d'habituation ou d'optimisation de la commande motrice en présence de régularité temporelle. Cette proposition se base notamment sur les observations de Thomas et al. (2019) de l'optimisation dynamique de l'activité musculaire et des temps de réponse lors de la répétition de stimuli réguliers, comparativement à des stimuli irréguliers sur le plan temporel. Le fait que la même réduction de variabilité en WBR soit observée dans la seconde étude, qui ne présente pas cette régularité unique par bloc, suggère qu'elle ne peut être attribuée à un simple effet d'habituation ou d'optimisation motrice liée à l'IC.

Une interprétation plus intégrative de nos résultats s'appuie sur la CBI. Plusieurs travaux ont montré que les mouvements peuvent simultanément biaiser les estimations temporelles et en améliorer la précision, ce qui s'explique par l'utilisation du mouvement comme une source supplémentaire d'information temporelle dont la fiabilité est pondérée au sein d'un estimateur bayésien. Dans ce cadre, chaque effecteur fournit un signal temporel bruité, et les signaux issus du mouvement et du stimulus à reproduire sont combinés selon une règle de pondération qui dépend de leur variance respective, comme dans les modèles de combinaison de signaux multisensoriels par estimation au maximum de vraisemblance.

Les mouvements de WBR fournissent un flux de signaux proprioceptifs, vestibulaires et efférents, probablement plus fiables temporellement que ceux associés à un simple mouvement de doigt (De Kock et al., 2023). Dans un cadre bayésien, l'intégration de ce signal plus fiable réduit la variance de l'estimation résultante, ce qui est en accord avec la diminution observée de la variabilité temporelle en WBR (De Kock et al., 2021). Parallèlement, les modèles bayésiens de perception du temps attribuent la tendance centrale à la combinaison d'un indice bruité avec un a priori centré sur la moyenne de la distribution des durées rencontrées dans la tâche (De Kock et al., 2021). En outre, comme le suggère Zimmermann & Cicchini (2020), la durée qui comporte le plus d'incertitude temporelle est celle qui subit la plus forte attraction vers l'intervalle central. Dans notre cas, les durées courtes et longues en WBR sont potentiellement celles qui présentent le plus d'incertitude temporelle.

Les résultats similaires entre nos deux études (i.e., la réduction de la variabilité temporelle en WBR par rapport au doigt) supportent l'idée d'un mécanisme commun indépendant du mouvement. Toutefois, nos résultats en lien avec l'IRT rendent compte également de la difficulté à identifier un marqueur généralisable du traitement temporel dans différents contextes. Comme le décrivent Matthews et Meck (2014), plusieurs mécanismes sont susceptibles d'opérer en parallèles, ce qui complique la recherche de modèles simples de traitement de l'information et de substrats neuronaux. D'autres modèles convergent vers l'idée que la représentation temporelle est distribuée, avec plusieurs mécanismes de traitement temporel coexistant au sein et entre les modalités sensorielles et motrices, plutôt qu'une horloge unique et centrale (Ivry & Schlerf, 2008; Paton & Buonomano, 2018). Alternativement, il a été proposé que la perception du temps repose sur un réseau « central » de traitement de l'information temporelle (*main core timing network* en anglais) recruté de manière systématique, et des régions cérébrales dont l'activation dépend du contexte spécifique (Merchant, Harrington, et al., 2013). Des méta-analyses en neuroimagerie confirment

l'implication systématique d'un réseau distribué dans le traitement du temps, incluant des structures comme les GB, le thalamus, le cervelet et des régions telles que l'AMS, le gyrus frontal inférieur et le cortex pariétal inférieur, ainsi que des modulations spécifiques en fonction de la gamme de durées, de la modalité et des exigences motrices ou perceptives des tâches (Merchant et al., 2008b; Mondok & Wiener, 2023; Naghibi et al., 2024; Nani et al., 2019; Wiener et al., 2010a). Cette perspective semble particulièrement pertinente pour rendre compte de l'ensemble de nos données, qui présentent à la fois des caractéristiques communes et des différences, ainsi que la difficulté à identifier un marqueur généralisable à différentes tâches de timing moteur.

4.3. Contrôle moteur et perception du temps

Dans les travaux sur la perception du temps, le mouvement est le plus souvent relégué au rang de simple instrument méthodologique (e.g., Kroger-Costa et al., 2013; Sayali et al., 2018), comparable à d'autres modulateurs comme l'éveil, l'attention ou l'émotion (e.g., Brown & Stubbs, 1992; Droit-Volet, 2013; Gil & Droit-Volet, 2012; Volkinburg & Balsam, 2014), ou comme un épiphénomène du traitement temporel, produit par une horloge interne centrale « tyrannique » (pour revue Burle et al., 2005). Cette approche tend à maintenir séparée deux domaines de recherche, le contrôle moteur et la perception du temps, alors qu'ils présentent des liens étroits (Balasubramaniam et al., 2021; De Kock et al., 2021; Merchant & Yarrow, 2016).

Dans ce travail de thèse, nous avons amorcé une articulation entre préparation et exécution motrice, et les performances temporelles. Nous montrons que les APAs s'adaptent en fonction de l'intervalle à reproduire et varient avec la précision temporelle pour les intervalles courts et moyens, tandis que ajustements du mouvement lors de l'exécution deviennent importantes lorsque la durée excède la durée naturelle du geste. Autrement dit, lorsque l'intervalle cible est court, la fenêtre temporelle limite les capacités de corrections en ligne et

confère une valeur décisive à la phase de préparation. En revanche, à mesure que la durée s'allonge, la contribution relative de ces composantes préparatoires décroît au profit de la régulation en cours d'exécution, ce qui rejoint le process du modèle hybride du contrôle continue pour des objectifs spatiaux, que les modèles internes sont continuellement recalibrés par les retours afférents et par l'estimation en ligne de l'erreur temporelle. Ainsi, lorsque l'intervalle est très long, il semble que le contrôle repose davantage sur ces capacités de corrections en ligne, comme le suggère la multiplication des pics de vitesse du centre de masse et du doigt par exemple. Cette capacité d'ajuster le mouvement pour atteindre l'objectif temporel a été mise en évidence précédemment par Billon et Semjen (1995) dans des tâches de timing moteur de synchronisation. En analysant la trajectoire en tâche de synchronisation, ils ont montré que la variabilité du déclenchement du tapotement induit des stratégies motrices distinctes pour atteindre la cible temporelle : un départ tardif s'accompagne d'une vitesse accrue, tandis qu'un départ précoce s'accompagne d'une vitesse réduite. Leur tâche diffère toutefois de la nôtre en plusieurs points : (i) leurs tâches impliquent de la rythmicité, tandis que la nôtre implique un intervalle cible unique ; (ii) leurs participants devaient être au bon endroit au bon moment, alors que les nôtres devaient auto-initier la reproduction et réguler la durée du mouvement en fonction de l'intervalle cible. Par conséquent, dans notre contexte, les stratégies d'ajustement ne se résument pas à des corrections dépendantes d'un début précoce ou tardif. Elles reposeraient plutôt sur l'intégration conjointe de l'intervalle perçu et de la préparation motrice, sur la perception temporelle durant la reproduction, ainsi que sur la capacité d'ajuster le mouvement en cours. Des travaux futurs pourraient, par exemple, examiner la correction en ligne de l'objectif temporel dans un mouvement de WBR, au même titre que celle de l'objectif spatial, à l'aide de paradigmes de type saut de cible, mais cette fois de nature temporelle plutôt que spatiale (e.g., Oostwoud Wijdenes et al., 2011, 2014; Veerman et al., 2008; Zhang et al., 2018)

Dans le cas du timing explicite et d'un mouvement d'atteinte du corps entier, nous proposons que la précision temporelle soit en concurrence avec d'autres objectifs, comme la conservation de l'équilibre et l'objectif spatial, qui varie en fonction des contraintes motrices propres aux mouvements. Lorsque les mouvements atteignent des vitesses rapides, le système moteur pourrait privilégier la conservation de l'équilibre et la précision spatiale au détriment de la précision temporelle, car une erreur spatiale ou de conservation de l'équilibre compromet le succès global du mouvement, alors qu'une erreur temporelle partielle n'entraîne pas un échec. Cette proposition repose sur le conflit vitesse-précision (Schmidt et al., 1979) et les principes de la théorie du contrôle optimal (Todorov, 2004; Todorov & Jordan, 2002). Selon ces principes, la commande motrice est le résultat de l'optimisation d'une fonction de coût interne, combinant des contraintes de précision, d'efficacité énergétique, de confort, et de fluidité du mouvement. Dans cette perspective, les mouvements ne sont pas simplement planifiés pour minimiser l'erreur, mais résultent d'un compromis global entre différentes exigences concurrentes. Selon ces modèles, agir et apporter des corrections coûte cher, en raison des coûts liés au contrôle du bruit moteur et de l'énergie. Dans ce cadre, selon la minimisation de l'intervention, les déviations temporelles ne sont corrigées activement que si elles compromettent significativement la performance globale. Or, dans une tâche d'atteinte du corps entier, une erreur temporelle, bien que mesurée, n'entraîne pas d'échec manifeste, contrairement à une erreur spatiale ou à la perte d'équilibre. Le système moteur peut donc tolérer une légère erreur temporelle pour éviter les coûts associés à une correction importante. Ceci semble d'autant plus probable lorsque les participants ne sont pas informés de leurs performances au cours de la tâche. En l'absence de feedback sur l'erreur temporelle, le système de contrôle moteur n'a pas d'incitation pour déclencher des ajustements coûteux. Cette hypothèse soulève la question de savoir en quoi des feedbacks influencent le contrôle moteur et dans quelle mesure les mécanismes de correction sont alors mobilisés pour réduire l'erreur

temporelle. Des travaux futurs pourront explorer cette interaction afin de mieux comprendre les mécanismes permettant la régulation des mouvements volontaires.

Dans la revue de la littérature de Burle et al. (2005) traitant de la nature du contrôle temporel des mouvements, les auteurs suggèrent l'existence d'un équilibre fonctionnel entre une horloge interne et le système moteur. Ils proposent que le contrôle temporel résulte d'une interaction dynamique plutôt que d'une domination de l'un ou de l'autre, comme ce fut initialement proposé par les modèles de l'horloge interne. Selon eux, lorsque les mouvements impliquant un déplacement réel dans l'espace, et non un simple changement de force, le rôle central de l'horloge interne est relativisé. Celle-ci doit communiquer avec le système moteur, dont l'influence devient alors significative. Ils proposent que dans des situations où la dynamique du mouvement prend une importance majeure (e.g., selon les articulations mises en jeu, ou lorsqu'une vitesse d'exécution trop élevée atteint les limites biomécaniques du système moteur), l'horloge, bien qu'encore présente, devient à son tour négligeable. Nos résultats semblent supporter cette proposition d'un équilibre fonctionnel entre le(s) mécanisme(s) du traitement de l'information temporelle et le système moteur. D'un point de vue comportemental, nous observons les caractéristiques attendues de la TTS aussi bien avec des mouvements de WBR que des mouvements de doigt et donc la possible implication d'une horloge interne. En outre, nous observons des performances similaires ou accrues lorsque les individus effectuent la tâche de reproduction temporelle avec un mouvement de WBR comparativement à un mouvement de doigt, qui pourrait s'expliquer par une accélération de l'horloge interne par le mouvement. Toutefois, l'élément qui semble moduler cet équilibre fonctionnel, au vu de nos résultats, n'est non pas les articulations mises en jeu, mais plutôt les limites biomécaniques du système moteur. En effet, nous observons des performances temporelles supérieurs en WBR comparativement au doigt (i.e., réduction de la variabilité temporelle), suggérant que l'augmentation du nombre de segments impliqués ne réduit pas l'implication de l'horloge

interne. En revanche, des mouvements effectués à une vitesse d'exécution élevée (e.g., durée très courte et courte de l'expérimentation 1 ; durée de 900 ms dans l'expérimentation 2) mène à une dégradation de la précision temporelle comparativement aux mouvements de doigt, suggérant potentiellement que le rôle de l'horloge joue un rôle mineur. D'un point de vue du contrôle moteur, on observe que la préparation et l'exécution du mouvement sont modulées en fonction de l'intervalle cible. Ceci converge avec l'idée que le système moteur est en interaction avec une possible horloge interne, afin d'intégrer la durée perçue lors de la phase d'encodage dans les programmes moteurs, mais également pour contrôler la durée en direct lors de l'exécution du mouvement. De plus, selon les théories du contrôle optimal, comme nous le suggérons dans l'étude 3, l'objectif temporel explicite pourrait devenir secondaire au profit du maintien de l'équilibre et de l'objectif spatial, supportant également cette notion d'équilibre fonctionnel entre le système moteur et l'horloge interne proposé par Burle et al. (2005). Des études futures seront nécessaires afin de préciser les mécanismes sous-jacents à l'interaction entre le jugement temporel explicite et la programmation motrice. À cette fin, il serait intéressant d'examiner l'organisation motrice en fonction du timing implicite et explicite. Nous pourrions par exemple étudier des mouvements de WBR exécutés à des vitesses rapides, moyennes et lentes (timing implicite), puis d'introduire des IC correspondant à ces trois durées, afin d'évaluer si les modifications de l'organisation motrice et les performances temporelles (e.g. variabilité de la durée du mouvement) diffèrent selon les IC et le type de timing. L'identification des processus impliqués et de leurs interactions apporterait des éléments supplémentaires à l'étude 3 pour la modélisation du contrôle moteur des mouvements de WBR avec un objectif temporel explicite.

Chapitre 5 : Conclusion et perspectives

« Le temps fait mûrir toutes choses ; nul ne naît sage » Miguel de Cervantes

Ce travail de thèse a permis de démontrer que le mouvement de WBR module activement la perception du temps. De façon intéressante, bien que plus complexe qu'un mouvement de doigt, le WBR réduit la variabilité temporelle dans une tâche de reproduction temporelle, en accord avec le cadre de la CBI et avec l'hypothèse d'une accélération de l'accumulateur dans la TTS. Toutefois, des vitesses rapides induisent des biais perceptifs plus marqués avec des mouvements de WBR, menant à une sur-reproduction, comparativement à des mouvements de doigt, pouvant résulter d'une compression subjective du temps liée à la vitesse du mouvement ou d'un conflit vitesse-précision. Par ailleurs, nous avons montré qu'un objectif temporel (i.e., la reproduction d'une durée cible) influence l'organisation motrice, pour une durée de mouvement identique, tant au niveau de la préparation que de l'exécution du mouvement. De plus, nous observons des différences dans la préparation et l'exécution du mouvement en fonction de l'objectif temporel explicite. Nos données montrent que la phase de préparation joue un rôle majeur pour les durées courtes et moyennes, tandis que l'exécution du mouvement joue d'avantage un rôle majeur pour des durées longues. Ces résultats suggèrent que l'objectif temporel explicite est intégré dès la planification puis maintenu dans la boucle de contrôle en ligne, prolongeant ainsi le modèle hybride de Desmurget et Grafton (2000) en postulant que les objectifs du mouvement peuvent être définis non seulement d'un point de vue spatial, mais aussi temporel. Dans l'ensemble, ce travail met en évidence l'existence de liens étroits entre les mécanismes du jugement temporel et du contrôle moteur, rappelant la notion d'équilibre fonctionnel entre le système moteur et l'horloge interne proposée par Burle et al. (2005).

Nos travaux sur l'interaction entre perception du temps et mouvement se sont limités aux tâches de timing moteur. Il serait intéressant d'étendre ces recherches aux tâches de timing perceptif (e.g., discrimination temporelle de mouvement biologique versus non biologique ; Allingham et al., 2021). De même, l'impact du mouvement sur le timing rétrospectif pourrait

être exploré, en comparant par exemple l'estimation temporelle d'une activité impliquant de nombreux mouvements (e.g., danse) par rapport à une activité avec peu de mouvements (e.g., lecture). De plus, des études récentes ont mis en évidence la capacité à détecter les erreurs temporelles (Akdoğan & Balcı, 2017; Bilgin & Kononowicz, 2025; Kononowicz & van Wassenhove, 2019). Bien que des travaux récents, ainsi que nos résultats démontrent que le mouvement peut influencer la performance temporelle, à notre connaissance, l'influence du mouvement sur la capacité à détecter les erreurs temporelles n'a pas encore été étudiée. Il serait pertinent de s'y intéresser, car le mouvement module la perception du temps et nous pouvons émettre l'hypothèse que le mouvement affecte également la capacité de détection des erreurs temporelles. Dernièrement, les méthodologies en EEG conventionnelles limitent souvent l'étude du mouvement en raison de leur sensibilité aux artefacts liés aux mouvements. En revanche, l'EEG mobile permet d'examiner des comportements moteurs plus écologiquement valides, au-delà des simples mouvements du doigt. Nous pourrions ainsi analyser les signatures neuronales de l'estimation temporelle au cours d'une tâche de reproduction temporelle impliquant des mouvements de WBR. En s'appuyant sur l'hypothèse d'une horloge interne centrale, et en considérant que la CNV reflète l'accumulation dans l'accumulateur du modèle d'horloge interne (Macar et al., 1999), nous pourrions par exemple déterminer si ces résultats sont valables peu importe le type de mouvement, afin de tester la proposition d'une horloge centrale. Nous pourrions également examiner si certains potentiels évoqués, survenant après la phase d'encodage ou de reproduction (e.g., le complexe N1P2 ou la composante positive tardive du timing (LPCt *; Late Positive Component of Timing* en anglais), ainsi que ceux précédant la phase de reproduction (e.g., Bereitschaftspotential, ou les bandes Mu/Bêta) sont corrélées aux performances temporelles (Kononowicz et al., 2017; McCone et al., 2023), afin de déterminer dans quelle mesure ces marqueurs du traitement temporel se généralisent à divers contextes moteurs (e.g., un mouvement de doigt versus WBR) et de mettre en évidence d'éventuels

mécanismes temporels communs sous-jacents à ces tâches. Comme le soulignent Kononowicz et al. (2017), les performances temporelles doivent être appréhendées comme un processus décisionnel complexe dans lequel, en plus d'un système d'horloge, de nombreuses fonctions cognitives jouent un rôle déterminant. De façon analogue à ce que nous observons au niveau moteur, où la phase préparatoire, l'exécution et les corrections en ligne contribuent différemment en fonction de la durée à reproduire, il apparaît pertinent de considérer l'ensemble de ces marqueurs neurophysiologiques (e.g., avant, pendant et après) plutôt que de les analyser isolément. Ces futurs travaux permettraient d'apporter des éléments supplémentaires pour déterminer les mécanismes participant à la perception du temps. En outre, cette approche permettrait aussi d'examiner comment un objectif temporel est intégré au sein d'un mouvement de WBR. De façon générale, cela pourrait contribuer aux champs du contrôle moteur et de l'interface Cerveau-Machine (Brain Machine Interface en anglais) en identifiant par exemple des marqueurs permettant de prédire l'intention du mouvement d'un point de vue temporel et ainsi de contrôler un dispositif d'assistance (e.g., Bai et al., 2011; Bulea et al., 2014; Morash et al., 2008; Müller et al., 2025; Tanaka & Saga, 2019; Tang et al., 2023).

Parallèlement, les avancées récentes en apprentissage automatique (*machine learning* en anglais) offrent des outils puissants pour traiter la complexité inhérente aux données issues de l'analyse du mouvement (Halilaj et al., 2018). Les données issues de ces études sont en effet de nature multimodale (cinématiques, cinétiques, électrophysiologiques), de haute résolution temporelle et hautement dimensionnelles, limitant dans certains cas les approches traditionnelles pour en extraire toute l'information pertinente (Halilaj et al., 2018). Dans ce contexte, l'intégration de méthodes supervisées (*supervised machine learning* en anglais) et non supervisées (*unsupervised machine learning* en anglais) apportent une nouvelle perspective. Plusieurs travaux ont démontré l'intérêt des techniques non supervisées, telles que le clustering (e.g., K-means), pour segmenter des données cinématiques et cinétiques ou

d'identifier des profils moteurs (Ackermans et al., 2019; Arac, 2020; Sawacha et al., 2020). Ces approches ont notamment permis d'identifier des schémas de mouvement distincts dans des populations de patients ou au cours du vieillissement (Guo et al., 2022; Liang et al., 2022), ou encore d'analyser des séries temporelles complexes de mouvements lombaires et pelviens (Higgins et al., 2023). Dans une étude récente, nous avons appliqué une approche d'apprentissage automatique non supervisée, actuellement disponible en pre-print (Pfaff & Casteran, 2024 ; voir Annexe 3). Nous avons utilisé l'algorithme K-means afin d'identifier des profils moteurs à partir des caractéristiques cinématiques de mouvements de WBR, chez des participants jeunes et âgés. L'objectif était de déterminer si le K-means permettait de révéler des patterns de contrôle moteur distincts, et d'évaluer dans quelle mesure ces profils étaient dépendants ou indépendants de l'âge. Des études futures pourraient exploiter ce type d'analyse pour étudier l'interaction perception du temps et mouvement, en identifiant par exemple des patterns de mouvement (in)dépendant de l'objectif temporel ou des performances temporelles.

Dans l'ensemble, le présent travail démontre une interaction entre le mouvement de WBR et la perception du temps. D'une part, les mouvements impliquant l'ensemble du corps, caractéristiques des activités motrices quotidiennes, modulent les capacités de traitement du temps. D'autre part, des objectifs temporels explicites peuvent être intégrés dans l'organisation motrice. L'ensemble de ces résultats suggère l'existence de relations étroites entre des mécanismes de jugement temporel et du contrôle moteur. Des travaux futurs permettront d'améliorer notre compréhension de cette interaction, ainsi que des mécanismes qui la sous-tendent.

Références bibliographiques

« Une pièce sans livres, c'est comme un corps sans âme. » Cicéron

Ackermans, T. M. A., Francksen, N. C., Casana-Eslava, R. V., Lees, C., Baltzopoulos, V., Lisboa, P. J. G., Hollands, M. A., O'Brien, T. D., & Maganaris, C. N. (2019). A novel multivariate approach for biomechanical profiling of stair negotiation. *Experimental Gerontology*, *124*, 110646. https://doi.org/10.1016/j.exger.2019.110646

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, *3*(2), 111-150. https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898

Akdoğan, B., & Balcı, F. (2017). Are you early or late? : Temporal error monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General*, *146*(3), 347-361. https://doi.org/10.1037/xge0000265

Alais, D., & Burr, D. (2019). Cue Combination Within a Bayesian Framework. *Multisensory Processes*. https://www.semanticscholar.org/paper/Cue-Combination-Within-a-Bayesian-Framework-Alais-Burr/99bf36a6d098618798389e3cf6ea1a5073fb8f02

Allan, L. G., & Kristofferson, A. B. (1974). Psychophysical theories of duration discrimination. *Perception & Psychophysics*, *16*(1), 26-34. https://doi.org/10.3758/BF03203244

Allingham, E., Hammerschmidt, D., & Wöllner, C. (2021). Time perception in human movement : Effects of speed and agency on duration estimation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *74*(3), 559-572. https://doi.org/10.1177/1747021820979518

Anelli, F., Candini, M., Cappelletti, M., Oliveri, M., & Frassinetti, F. (2015). The Remapping of Time by Active Tool-Use. *PLOS ONE*, *10*(12), e0146175. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146175

Arac, A. (2020). Machine Learning for 3D Kinematic Analysis of Movements in Neurorehabilitation. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, *20*(8), 29. https://doi.org/10.1007/s11910-020-01049-z

Artieda, J., Pastor, M. A., Lacruz, F., & Obeso, J. A. (1992). Temporal discrimination is abnormal in Parkinson's disease. *Brain: A Journal of Neurology*, *115 Pt 1*, 199-210. https://doi.org/10.1093/brain/115.1.199

Aruin, A. S., & Latash, M. L. (1995). The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations. *Experimental Brain Research*, *106*(2), 291-300. https://doi.org/10.1007/BF00241125

Aruin, A. S., & Shiratori, T. (2004). The effect of the amplitude of motor action on anticipatory postural adjustments. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *14*(4), 455-462. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2003.12.002

Bai, O., Rathi, V., Lin, P., Huang, D., Battapady, H., Fei, D.-Y., Schneider, L., Houdayer, E., Chen, X., & Hallett, M. (2011). Prediction of human voluntary movement before it occurs. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, *122*(2), 364-372. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.07.010

Baker, K., Rochester, L., & Nieuwboer, A. (2008). The effect of cues on gait variability—Reducing the attentional cost of walking in people with Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, *14*(4), 314-320. https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2007.09.008

Balasubramaniam, R., Haegens, S., Jazayeri, M., Merchant, H., Sternad, D., & Song, J.-H. (2021). Neural Encoding and Representation of Time for Sensorimotor Control and Learning. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *41*(5), 866-872. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1652-20.2020

Balci, F., Ludvig, E. A., Gibson, J. M., Allen, B. D., Frank, K. M., Kapustinski, B. J., Fedolak, T. E., & Brunner, D. (2008). Pharmacological manipulations of interval timing using the peak procedure in male C3H mice. *Psychopharmacology*, *201*(1), 67-80. https://doi.org/10.1007/s00213-008-1248-y

Ball, D. M., Arnold, D. H., & Yarrow, K. (2017). Weighted integration suggests that visual and tactile signals provide independent estimates about duration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(5), 868-880. https://doi.org/10.1037/xhp0000368

Bastioli, G., Arnold, J. C., Mancini, M., Mar, A. C., Gamallo-Lana, B., Saadipour, K., Chao, M. V., & Rice, M. E. (2022). Voluntary Exercise Boosts Striatal Dopamine Release : Evidence for the Necessary and Sufficient Role of BDNF. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *42*(23), 4725-4736. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2273-21.2022

Bella, S. D., Benoit, C.-E., Farrugia, N., Keller, P. E., Obrig, H., Mainka, S., & Kotz, S. A. (2017). Gait improvement via rhythmic stimulation in Parkinson's disease is linked to rhythmic skills. *Scientific Reports*, *7*, 42005. https://doi.org/10.1038/srep42005

Benoit, C.-E., Dalla Bella, S., Farrugia, N., Obrig, H., Mainka, S., & Kotz, S. A. (2014). Musically Cued Gait-Training Improves Both Perceptual and Motor Timing in Parkinson's Disease. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00494

Berret, B., Bonnetblanc, F., Papaxanthis, C., & Pozzo, T. (2009). Modular control of pointing beyond arm's length. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *29*(1), 191-205. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3426-08.2009

Bertucco, M., & Cesari, P. (2010). Does movement planning follow Fitts' law? Scaling anticipatory postural adjustments with movement speed and accuracy. *Neuroscience*, *171*(1), 205-213. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.023

Bi, Z., & Zhou, C. (2020). Understanding the computation of time using neural network models. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(19), 10530-10540. https://doi.org/10.1073/pnas.1921609117

Bilgin, S. N., & Kononowicz, T. W. (2025). Temporal error monitoring : Monitoring of internal clock or just motor noise? *Consciousness and Cognition*, *130*, 103849. https://doi.org/10.1016/j.concog.2025.103849

Billon, M., & Semjen, A. (1995). The timing effects of accent production in synchronization and continuation tasks performed by musicians and nonmusicians. *Psychological Research*, *58*(3), 206-217. https://doi.org/10.1007/BF00419635

Binetti, N., Siegler, I. A., Bueti, D., & Doricchi, F. (2010). Time in motion : Effects of whole-body rotatory accelerations on timekeeping processes. *Neuropsychologia*, *48*(6), 1842-1852. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.03.009

Block, R. A. (Éd.). (1990). *Cognitive Models of Psychological Time*. Psychology Press. https://doi.org/10.4324/9781315807898

Block, R. A., Grondin, S., & Zakay, D. (2018). *Prospective and Retrospective Timing Processes : Theories, Methods, and Findings*. Brill. https://doi.org/10.1163/9789004280205_003

Bonnet, M., Chambrietto, M., Decety, J., & Vidal, F. (1998). Laplacian ERPs for preparation to imagine a learned motor sequence. Current Psychology of Cognition. *Current Psychology of Cognition/Cahiers de Psychologie*, *17*, 658-698.

Bonnetblanc, F., Martin, O., & Teasdale, N. (2004). Pointing to a target from an upright standing position : Anticipatory postural adjustments are modulated by the size of the target in humans. *Neuroscience Letters*, *358*(3), 181-184. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2004.01.020

Bortoletto, M., Cook, A., & Cunnington, R. (2011). Motor timing and the preparation for sequential actions. *Brain and Cognition*, *75*(2), 196-204. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.11.016

Braver, T. S., & Barch, D. M. (2006). Extracting core components of cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(12), 529-532. https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.10.006

Brody, C. D., Hernández, A., Zainos, A., & Romo, R. (2003). Timing and neural encoding of somatosensory parametric working memory in macaque prefrontal cortex. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *13*(11), 1196-1207. https://doi.org/10.1093/cercor/bhg100

Brooks, V. B., & Thach, W. T. (2011). Cerebellar Control of Posture and Movement. In *Comprehensive Physiology* (p. 877-946). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/cphy.cp010218

Brown, S. W. (1997). Attentional resources in timing : Interference effects in concurrent temporal and nontemporal working memory tasks. *Perception & Psychophysics*, *59*(7), 1118-1140. https://doi.org/10.3758/bf03205526

Brown, S. W. (2008). The attenuation effect in timing : Counteracting dual-task interference with time-judgment skill training. *Perception*, *37*(5), 712-724. https://doi.org/10.1068/p5698

Brown, S. W., & Stubbs, D. A. (1992). Attention and interference in prospective and retrospective timing. *Perception*, *21*(4), 545-557. https://doi.org/10.1068/p210545

Bruttini, C., Esposti, R., Bolzoni, F., & Cavallari, P. (2014). Ischemic block of the forearm abolishes finger movements but not their associated anticipatory postural adjustments. *Experimental Brain Research*, *232*(6), 1739-1750. https://doi.org/10.1007/s00221-014-3866-4

Bueno, F. D., Nobre, A. C., & Cravo, A. M. (2024). Time for What? Dissociating Explicit Timing Tasks through Electrophysiological Signatures. *eNeuro*, *11*(2), ENEURO.0351-23.2023. https://doi.org/10.1523/ENEURO.0351-23.2023

Buhusi, C., & Meck, W. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature reviews. Neuroscience*, *6*, 755-765. https://doi.org/10.1038/nrn1764

Bulea, T. C., Prasad, S., Kilicarslan, A., & Contreras-Vidal, J. L. (2014). Sitting and standing intention can be decoded from scalp EEG recorded prior to movement execution. *Frontiers in Neuroscience*, *8*. https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00376

Buonomano, D. V. (2000). Decoding Temporal Information : A Model Based on Short-Term Synaptic Plasticity. *Journal of Neuroscience*, *20*(3), 1129-1141. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.20-03-01129.2000

Buonomano, D. V. (2014). Neural dynamics based timing in the subsecond to seconds range. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *829*, 101-117. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1782-2_6

Burle, B., Vidal, F., & Semjen, A. (2005). Le geste approprié au juste moment : Faut-il une horloge pour que le mouvement soit dans les temps? [The right gesture at the right time: Do we need a clock for the movement to be in time?]. *Psychologie Française*, *50*(1), 117-129. https://doi.org/10.1016/j.psfr.2004.10.010

Busse, L., Cardin, J. A., Chiappe, M. E., Halassa, M. M., McGinley, M. J., Yamashita, T., & Saleem, A. B. (2017). Sensation during Active Behaviors. *Journal of Neuroscience*, *37*(45), 10826-10834. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1828-17.2017

Cao, L., & Händel, B. (2019). Walking enhances peripheral visual processing in humans. *PLOS Biology*, *17*(10), e3000511. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000511

Capelli, A., Deborne, R., & Israel, I. (2007). Temporal Intervals Production During Passive Self-Motion in Darkness. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain and Cognition*, *2*. https://doi.org/10.4000/cpl.2672

Carlini, A., & French, R. (2014). Visual tracking combined with hand-tracking improves time perception of moving stimuli. *Scientific Reports*, *4*, 5363. https://doi.org/10.1038/srep05363

Castellotti, S., D'Agostino, O., Biondi, A., Pignatiello, L., & Del Viva, M. M. (2022). Influence of Motor and Cognitive Tasks on Time Estimation. *Brain Sciences*, *12*(3), 404. https://doi.org/10.3390/brainsci12030404

Casteran, M., Hilt, P. M., Mourey, F., Manckoundia, P., French, R., & Thomas, E. (2018). Shifts in Key Time Points and Strategies for a Multisegment Motor Task in Healthy Aging Subjects. *The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, *73*(12), 1609-1617. https://doi.org/10.1093/gerona/gly066

Casteran, M., Manckoundia, P., Pozzo, T., & Thomas, E. (2013a). Alterations with Movement Duration in the Kinematics of a Whole Body Pointing Movement. *PLoS ONE*, *8*(1), e52477. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052477

Casteran, M., Manckoundia, P., Pozzo, T., & Thomas, E. (2013b). Alterations with movement duration in the kinematics of a whole body pointing movement. *PloS One*, *8*(1), e52477. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052477

Cavallari, P., Bolzoni, F., Bruttini, C., & Esposti, R. (2016). The Organization and Control of Intra-Limb Anticipatory Postural Adjustments and Their Role in Movement Performance. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00525

Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *18*(12), 2844-2854. https://doi.org/10.1093/cercor/bhn042

Chen, Y.-H., & Cesari, P. (2015). Elite athletes refine their internal clocks. *Motor Control*, *19*(1), 90-101. https://doi.org/10.1123/mc.2013-0081

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

Church, R. M. (2003). A concise introduction to scalar timing theory. In *Functional and neural mechanisms of interval timing* (p. 3-22). CRC Press/Routledge/Taylor & Francis Group. https://doi.org/10.1201/9780203009574.sec1

Cicchini, G. M., Arrighi, R., Cecchetti, L., Giusti, M., & Burr, D. C. (2012). Optimal encoding of interval timing in expert percussionists. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *32*(3), 1056-1060. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3411-11.2012

Cicchini, G. M., & Morrone, M. C. (2009). Shifts in spatial attention affect the perceived duration of events. *Journal of Vision*, *9*(1), 9.1-13. https://doi.org/10.1167/9.1.9

Cope, T. E., Grube, M., Singh, B., Burn, D. J., & Griffiths, T. D. (2014). The basal ganglia in perceptual timing : Timing performance in Multiple System Atrophy and Huntington's disease. *Neuropsychologia*, *52*, 73-81. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.09.039

Correa, Á., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2005). Attentional preparation based on temporal expectancy modulates processing at the perceptual level. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(2), 328-334. https://doi.org/10.3758/BF03196380

Coull, J., & Nobre, A. (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology*, *18*(2), 137-144. https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.07.011

Coull, J. T. (2004). fMRI studies of temporal attention : Allocating attention within, or towards, time. *Cognitive Brain Research*, *21*(2), 216-226. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.02.011

Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., & Vidal, F. (2015). SMA Selectively Codes the Active Accumulation of Temporal, Not Spatial, Magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *27*(11), 2281-2298. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00854

Coull, J. T., Cheng, R.-K., & Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, *36*(1), 3-25. https://doi.org/10.1038/npp.2010.113

Coull, J. T., & Droit-Volet, S. (2018). Explicit Understanding of Duration Develops Implicitly through Action. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(10), 923-937. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.07.011

Coull, J. T., Vidal, F., & Burle, B. (2016). When to act, or not to act : That's the SMA's question. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.01.003

Coull, J. T., Vidal, F., Nazarian, B., & Macar, F. (2004). Functional Anatomy of the Attentional Modulation of Time Estimation. *Science*, *303*(5663), 1506-1508. https://doi.org/10.1126/science.1091573

Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, *34*(5), 582-593. https://doi.org/10.1121/1.1918172

D'Andrea-Penna, G. M., Iversen, J. R., Chiba, A. A., Khalil, A. K., & Minces, V. H. (2020). One Tap at a Time : Correlating Sensorimotor Synchronization with Brain Signatures of Temporal Processing. *Cerebral Cortex Communications*, *1*(1), tgaa036. https://doi.org/10.1093/texcom/tgaa036

De Kock, R., Gladhill, K. A., Ali, M. N., Joiner, W. M., & Wiener, M. (2021). How movements shape the perception of time. *Trends in Cognitive Sciences*, *25*(11), 950-963. https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.08.002

De Kock, R., Zhou, W., Datta, P., Mychal Joiner, W., & Wiener, M. (2023). The role of consciously timed movements in shaping and improving auditory timing. *Proceedings. Biological Sciences*, *290*(1992), 20222060. https://doi.org/10.1098/rspb.2022.2060

DeCarlo, L. T., & Cross, D. V. (1990). Sequential effects in magnitude scaling : Models and theory. *Journal of Experimental Psychology: General*, *119*(4), 375-396. https://doi.org/10.1037/0096-3445.119.4.375

Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law : A logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(4), 145-147. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X

Dehaene, S., & Brannon, E. M. (2010). Space, time, and number : A Kantian research program. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(12), 517-519. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.009

Desmurget, M., Epstein, C. M., Turner, R. S., Prablanc, C., Alexander, G. E., & Grafton, S. T. (1999). Role of the posterior parietal cortex in updating reaching movements to a visual target. *Nature Neuroscience*, *2*(6), 563-567. https://doi.org/10.1038/9219

Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(11), 423-431. https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01537-0

Dosenbach, N. U. F., Visscher, K. M., Palmer, E. D., Miezin, F. M., Wenger, K. K., Kang, H. C., Burgund, E. D., Grimes, A. L., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2006). A core system for the implementation of task sets. *Neuron*, *50*(5), 799-812. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.04.031

Drewing, K., Hennings, M., & Aschersleben, G. (2002). The contribution of tactile reafference to temporal regularity during bimanual finger tapping. *Psychological Research*, *66*(1), 60-70. https://doi.org/10.1007/s004260100074

Droit-Volet, S. (2013). Time perception, emotions and mood disorders. *Journal of Physiology, Paris*, *107*(4), 255-264. https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2013.03.005

Droit-Volet, S., & Rattat, A.-C. (1999). Are time and action dissociated in young children's time estimation? *Cognitive Development*, *14*(4), 573-595. https://doi.org/10.1016/S0885-2014(99)00020-9

Duzcu, H. (2019). A neural marker of the start-gun in interval timing : Onset N1P2. *Behavioral Neuroscience*, *133*(4), 414-427. https://doi.org/10.1037/bne0000325

Duzcu, H., Özkurt, T. E., Mapelli, I., & Hohenberger, A. (2019). N1-P2 : Neural markers of temporal expectation and response discrimination in interval timing. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *79*(2), 193-204.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, *415*(6870), 429-433. https://doi.org/10.1038/415429a

Ernst, M. O., & Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(4), 162-169. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002

Esposti, R., Bruttini, C., Bolzoni, F., & Cavallari, P. (2015). Intended rather than actual movement velocity determines the latency of anticipatory postural adjustments. *Experimental Brain Research*, *233*(2), 397-403. https://doi.org/10.1007/s00221-014-4122-7

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3 : A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175-191. https://doi.org/10.3758/bf03193146

Fautrelle, L., Ballay, Y., & Bonnetblanc, F. (2010). Muscular synergies during motor corrections : Investigation of the latencies of muscle activities. *Behavioural Brain Research*, *214*(2), 428-436. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2010.06.015

Fautrelle, L., Berret, B., Chiovetto, E., Pozzo, T., & Bonnetblanc, F. (2010). Equilibrium constraints do not affect the timing of muscular synergies during the initiation of a whole body reaching movement. *Experimental Brain Research*, *203*(1), 147-158. https://doi.org/10.1007/s00221-010-2219-1

Fautrelle, L., Mareschal, D., French, R., Addyman, C., & Thomas, E. (2015). Motor Activity Improves Temporal Expectancy. *PLoS ONE*, *10*(3), e0119187. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119187

Fautrelle, L., Prablanc, C., Berret, B., Ballay, Y., & Bonnetblanc, F. (2010). Pointing to double-step visual stimuli from a standing position : Very short latency (express) corrections are observed in upper and lower limbs and may not require cortical involvement. *Neuroscience*, *169*(2), 697-705. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.014

Fontes, R., Ribeiro, J., Gupta, D. S., Machado, D., Lopes-Júnior, F., Magalhães, F., Bastos, V. H., Rocha, K., Marinho, V., Lima, G., Velasques, B., Ribeiro, P., Orsini, M., Pessoa, B., Leite, M. A. A., & Teixeira, S. (2016). Time Perception Mechanisms at Central Nervous System. *Neurology International*, *8*(1), 5939. https://doi.org/10.4081/ni.2016.5939

Franklin, D. W., & Wolpert, D. M. (2011). Computational Mechanisms of Sensorimotor Control. *Neuron*, *72*(3), 425-442. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.10.006

Gale, D. J., Areshenkoff, C. N., Honda, C., Johnsrude, I. S., Flanagan, J. R., & Gallivan, J. P. (2021). Motor Planning Modulates Neural Activity Patterns in Early Human Auditory Cortex. *Cerebral Cortex*, *31*(6), 2952-2967. https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa403

Gardner, H. R., Konrad, A., Alizadeh, S., Graham, A., & Behm, D. G. (2023). Temporal perception is distorted by submaximal and maximal isometric contractions of the knee extensors in young healthy males and females. *Frontiers in Sports and Active Living*, *5*. https://doi.org/10.3389/fspor.2023.1185480

Gavazzi, G., Bisio, A., & Pozzo, T. (2013). Time perception of visual motion is tuned by the motor representation of human actions. *Scientific Reports*, *3*(1), 1168. https://doi.org/10.1038/srep01168

Gaveau, V., Pisella, L., Priot, A.-E., Fukui, T., Rossetti, Y., Pélisson, D., & Prablanc, C. (2014). Automatic online control of motor adjustments in reaching and grasping. *Neuropsychologia*, *55*, 25-40. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.12.005

Gibbon, J., & Allan, L. (1984). Introduction. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*(1), 1-1. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23412.x

Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar Timing in Memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*(1), 52-77. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x

Gil, S., & Droit-Volet, S. (2012). Emotional time distortions : The fundamental role of arousal. *Cognition and Emotion*, *26*(5), 847-862. https://doi.org/10.1080/02699931.2011.625401

Glasauer, S., & Shi, Z. (2021). The origin of Vierordt's law : The experimental protocol matters. *PsyCh Journal*, *10*(5), 732-741. https://doi.org/10.1002/pchj.464

Goel, A., & Buonomano, D. V. (2014). Timing as an intrinsic property of neural networks : Evidence from in vivo and in vitro experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*(1637), 20120460. https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0460

Goldberg, G. (1985). Supplementary motor area structure and function : Review and hypotheses. *Behavioral and Brain Sciences*, *8*(4), 567-588. https://doi.org/10.1017/S0140525X00045167

Gomi, H. (2008). Implicit online corrections of reaching movements. *Current Opinion in Neurobiology*, *18*(6), 558-564. https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.11.002

Gordon, C. L., Cobb, P. R., & Balasubramaniam, R. (2018). Recruitment of the motor system during music listening : An ALE meta-analysis of fMRI data. *PloS One*, *13*(11), e0207213. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207213

Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(5), 893-906. https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.5.893

Grondin, S. (2010). Timing and time perception : A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *72*(3), 561-582. https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561

Grondin, S. (2014). About the (non)scalar property for time perception. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *829*, 17-32. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1782-2_2

Gümüş, G., & Balcı, F. (2023). Working memory for time intervals : Another manifestation of the central tendency effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, *30*(6), 2289-2295. https://doi.org/10.3758/s13423-023-02324-z

Guo, J., Zhang, Z., Sternad, D., & Song, J.-H. (2019). Improved motor timing enhances time perception. *Journal of Vision*, *19*, 218b. https://doi.org/10.1167/19.10.218b

Guo, X., He, B., Lau, K. Y. S., Chan, P. P. K., Liu, R., Xie, J. J., Ha, S. C. W., Chen, C.-Y., Cheing, G. L. Y., Cheung, R. T. H., Chan, R. H. M., & Cheung, V. C. K. (2022). Age-Related Modifications of Muscle Synergies and Their Temporal Activations for Overground Walking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, *30*, 2700-2709. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3206887

Hagura, N., Kanai, R., Orgs, G., & Haggard, P. (2012). Ready steady slow : Action preparation slows the subjective passage of time. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1339

Halilaj, E., Rajagopal, A., Fiterau, M., Hicks, J. L., Hastie, T. J., & Delp, S. L. (2018). Machine learning in human movement biomechanics : Best practices, common pitfalls, and new

opportunities. *Journal of Biomechanics*, *81*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.09.009

Harrington, D. L., Zimbelman, J. L., Hinton, S. C., & Rao, S. M. (2010). Neural modulation of temporal encoding, maintenance, and decision processes. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *20*(6), 1274-1285. https://doi.org/10.1093/cercor/bhp194

Harrison, A. W., Mannion, D. J., Jack, B. N., Griffiths, O., Hughes, G., & Whitford, T. J. (2021). Sensory attenuation is modulated by the contrasting effects of predictability and control. *NeuroImage*, *237*, 118103. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118103

Hartcher-O'Brien, J., Luca, M. D., & Ernst, M. O. (2014). The Duration of Uncertain Times : Audiovisual Information about Intervals Is Integrated in a Statistically Optimal Fashion. *PLOS ONE*, *9*(3), e89339. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089339

Hass, J., Blaschke, S., & Herrmann, J. M. (2012). Cross-Modal Distortion of Time Perception : Demerging the Effects of Observed and Performed Motion. *PLOS ONE*, *7*(6), e38092. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038092

Hausdorff, J. M., Cudkowicz, M. E., Firtion, R., Wei, J. Y., & Goldberger, A. L. (1998). Gait variability and basal ganglia disorders : Stride-to-stride variations of gait cycle timing in Parkinson's disease and Huntington's disease. *Movement Disorders: Official Journal of the Movement Disorder Society*, *13*(3), 428-437. https://doi.org/10.1002/mds.870130310

Helmuth, L. L., & Ivry, R. B. (1996). When two hands are better than one : Reduced timing variability during bimanual movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *22*(2), 278-293. https://doi.org/10.1037/0096-1523.22.2.278

Helson, H. (1959). Adaptation level theory. In *Psychology : A study of a science.: Vol. Vol. 1. Sensory, perceptual, and physiological formulations.* (S. Koch). McGraw-Hill.

Hemmes, N. S., Brown, B. L., & Kladopoulos, C. N. (2004). Time perception with and without a concurrent nontemporal task. *Perception & Psychophysics*, *66*(2), 328-341. https://doi.org/10.3758/bf03194882

Herbst, S. K., Obleser, J., & van Wassenhove, V. (2022). Implicit Versus Explicit Timing-Separate or Shared Mechanisms? *Journal of Cognitive Neuroscience*, *34*(8), 1447-1466. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01866

Hicks, R. E., Miller, G. W., & Kinsbourne, M. (1976). Prospective and Retrospective Judgments of Time as a Function of Amount of Information Processed. *The American Journal of Psychology*, *89*(4), 719-730. https://doi.org/10.2307/1421469

Higgins, S., Dutta, S., & Kakar, R. S. (2023). Machine learning for lumbar and pelvis kinematics clustering. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-14. https://doi.org/10.1080/10255842.2023.2241593

Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., & Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science (New York, N.Y.)*, *182*(4108), 177-180. https://doi.org/10.1126/science.182.4108.177

Hilt, P. M., Berret, B., Papaxanthis, C., Stapley, P. J., & Pozzo, T. (2016). Evidence for subjective values guiding posture and movement coordination in a free-endpoint whole-body reaching task. *Scientific Reports*, *6*(1), 23868. https://doi.org/10.1038/srep23868

Hilt, P. M., Delis, I., Pozzo, T., & Berret, B. (2018). Space-by-Time Modular Decomposition Effectively Describes Whole-Body Muscle Activity During Upright Reaching in Various Directions. *Frontiers in Computational Neuroscience*, *12*. https://doi.org/10.3389/fncom.2018.00020

Hoagland, H. (1933). The physiological control of judgments of duration : Evidence for a chemical clock. *Journal of General Psychology*, *9*, 267-287. https://doi.org/10.1080/00221309.1933.9920937

Horak, F. B., Esselman, P., Anderson, M. E., & Lynch, M. K. (1984). The effects of movement velocity, mass displaced, and task certainty on associated postural adjustments made by normal and hemiplegic individuals. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *47*(9), 1020-1028. https://doi.org/10.1136/jnnp.47.9.1020

Hudson, T. E., Maloney, L. T., & Landy, M. S. (2008). Optimal Compensation for Temporal Uncertainty in Movement Planning. *PLOS Computational Biology*, *4*(7), e1000130. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000130

Iordanescu, L., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2013). Action enhances auditory but not visual temporal sensitivity. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(1), 108-114. https://doi.org/10.3758/s13423-012-0330-y

Israël, I., Capelli, A., Sablé, D., Laurent, C., Lecoq, C., & Bredin, J. (2004). Multifactorial interactions involved in linear self-transport distance estimate : A place for time. *International Journal of Psychophysiology*, *53*(1), 21-28. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.01.002

Ivanenko, Y. P., Cappellini, G., Dominici, N., Poppele, R. E., & Lacquaniti, F. (2005). Coordination of locomotion with voluntary movements in humans. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *25*(31), 7238-7253. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1327-05.2005

Ivry, R. B., Keele, S. W., & Diener, H. C. (1988). Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Experimental Brain Research*, *73*(1), 167-180. https://doi.org/10.1007/BF00279670

Ivry, R. B., & Richardson, T. C. (2002). Temporal control and coordination : The multiple timer model. *Brain and Cognition*, *48*(1), 117-132. https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1308

Ivry, R. B., & Schlerf, J. E. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(7), 273-280. https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.04.002

Ivry, R. B., & Spencer, R. M. (2004). The neural representation of time. *Current Opinion in Neurobiology*, *14*(2), 225-232. https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.013

Ivry, R. B., Spencer, R. M., Zelaznik, H. N., & Diedrichsen, J. (2002). The cerebellum and event timing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *978*, 302-317. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2002.tb07576.x

Iwasaki, M., Noguchi, Y., & Kakigi, R. (2019). Neural correlates of time distortion in a preaction period. *Human Brain Mapping*, *40*(3), 804-817. https://doi.org/10.1002/hbm.24413

Iwasaki, M., Tomita, K., & Noguchi, Y. (2017). Non-uniform transformation of subjective time during action preparation. *Cognition*, *160*, 51-61. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.12.011

Jacobs, J. V., Lou, J. S., Kraakevik, J. A., & Horak, F. B. (2009). The supplementary motor area contributes to the timing of the anticipatory postural adjustment during step initiation in participants with and without Parkinson's disease. *Neuroscience*, *164*(2), 877-885. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.08.002

Jahanshahi, M., Jones, C. R. G., Zijlmans, J., Katzenschlager, R., Lee, L., Quinn, N., Frith, C. D., & Lees, A. J. (2010). Dopaminergic modulation of striato-frontal connectivity during motor timing in Parkinson's disease. *Brain: A Journal of Neurology*, *133*(Pt 3), 727-745. https://doi.org/10.1093/brain/awq012

James, W. (1890). *The Principles of Psychology*. http://ebooks.adelaide.edu.au/j/james/william/principles/

Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, *13*(8), 1020-1026. https://doi.org/10.1038/nn.2590

Jones, C. R. G., & Jahanshahi, M. (2014). Contributions of the basal ganglia to temporal processing : Evidence from Parkinson's Disease. *Timing & Time Perception*, *2*(1), 87-127. https://doi.org/10.1163/22134468-00002009

Jones, L. A., Poliakoff, E., & Wells, J. (2009). Good vibrations : Human interval timing in the vibrotactile modality. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*(11), 2171-2186. https://doi.org/10.1080/17470210902782200

Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, *96*(3), 459-491. https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.3.459

Jürgens, R., & Becker, W. (2006). Perception of angular displacement without landmarks : Evidence for Bayesian fusion of vestibular, optokinetic, podokinesthetic, and cognitive information. *Experimental Brain Research*, *174*(3), 528-543. https://doi.org/10.1007/s00221-006-0486-7

Kaminski, T. R., Bock, C., & Gentile, A. M. (1995). The coordination between trunk and arm motion during pointing movements. *Experimental Brain Research*, *106*(3), 457-466. https://doi.org/10.1007/BF00231068

Kao, T.-C., Sadabadi, M. S., & Hennequin, G. (2021). Optimal anticipatory control as a theory of motor preparation : A thalamo-cortical circuit model. *Neuron*, *109*(9), 1567-1581.e12. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2021.03.009

Karmarkar, U. R., & Buonomano, D. V. (2007). Timing in the Absence of Clocks : Encoding Time in Neural Network States. *Neuron*, *53*(3), 427-438. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.01.006

Kaushik, P., Moye, A., Vugt, M. van, & Roy, P. P. (2022). Decoding the cognitive states of attention and distraction in a real-life setting using EEG. *Scientific Reports*, *12*(1), 20649. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24417-w

Keele, S. W., Pokorny, R. A., Corcos, D. M., & Ivry, R. (1985). Do perception and motor production share common timing mechanisms : A correlational analysis. *Acta Psychologica*, *60*(2), 173-191. https://doi.org/10.1016/0001-6918(85)90054-X

Keele, S. W., & Posner, M. I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, *77*(1), 155-158. https://doi.org/10.1037/h0025754

Kelly, S. P., & O'Connell, R. G. (2013). Internal and External Influences on the Rate of Sensory Evidence Accumulation in the Human Brain. *Journal of Neuroscience*, *33*(50), 19434-19441. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3355-13.2013

Kendall, F. P., McCreary, E. K., Provance, P. G., Rodgers, M. M., & Romani, W. A. (2005). *Muscles : Testing and Testing and Function with Posture and Pain* (Fifth, North American edition). LWW.

Khudados, E., Cody, F. W. J., & O'Boyle, D. J. (1999). Proprioceptive regulation of voluntary ankle movements, demonstrated using muscle vibration, is impaired by Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *67*(4), 504-510. https://doi.org/10.1136/jnnp.67.4.504

Killeen, P. R., & Fetterman, J. G. (1988). A behavioral theory of timing. *Psychological Review*, *95*(2), 274-295. https://doi.org/10.1037/0033-295X.95.2.274

Kladopoulos, C. N., Hemmes, N. S., & Brown, B. L. (2004). Prospective timing under dual-task paradigms : Attentional and contextual-change mechanisms. *Behavioural Processes*, *67*(2), 221-233. https://doi.org/10.1016/j.beproc.2003.12.004

Klapp, S. T. (1979). Doing two things at once : The role of temporal compatibility. *Memory & Cognition*, *7*(5), 375-381. https://doi.org/10.3758/BF03196942

Klapp, S. T. (1981). Temporal compatibility in dual motor tasks II : Simultaneous articulation and hand movements. *Memory & Cognition*, *9*(4), 398-401. https://doi.org/10.3758/BF03197565

Klapp, S. T., Wyatt, E. P., & Lingo, W. M. (1974). Response programming in simple and choice reactions. *Journal of Motor Behavior*, *6*(4), 263-271. https://doi.org/10.1080/00222895.1974.10735002

Koch, G., Oliveri, M., & Caltagirone, C. (2009). Neural networks engaged in milliseconds and seconds time processing : Evidence from transcranial magnetic stimulation and patients with cortical or subcortical dysfunction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1525), 1907-1918. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0018

Kononowicz, T., Rijn, H., & Meck, W. (2017). *Timing and Time Perception : A Critical Review of Neural Timing Signatures Before, During, and After the To-Be-Timed Interval* (p. 453-490).

Kononowicz, T. W., & Penney, T. B. (2016). The contingent negative variation (CNV) : Timing isn't everything. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 231-237. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.02.022

Kononowicz, T. W., Sander, T., & van Rijn, H. (2015). Neuroelectromagnetic signatures of the reproduction of supra-second durations. *Neuropsychologia*, *75*, 201-213. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.06.001

Kononowicz, T. W., & van Rijn, H. (2011). Slow Potentials in Time Estimation : The Role of Temporal Accumulation and Habituation. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *5*, 48. https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00048

Kononowicz, T. W., & van Rijn, H. (2014). Decoupling interval timing and climbing neural activity : A dissociation between CNV and N1P2 amplitudes. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *34*(8), 2931-2939. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2523-13.2014

Kononowicz, T. W., & van Wassenhove, V. (2019). Evaluation of Self-generated Behavior : Untangling Metacognitive Readout and Error Detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(11), 1641-1657. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01442

Kotz, S. A., Brown, R. M., & Schwartze, M. (2016). Cortico-striatal circuits and the timing of action and perception. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 42-45. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.01.010

Kroger-Costa, A., Machado, A., & Santos, J. A. (2013). Effects of motion on time perception. *Behavioural Processes*, *95*, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.beproc.2013.02.002

Kugler, P., Kelso, S., & Turvey, M. (1980). 1 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures : I. Theoretical Lines of Convergence*. *Advances in Psychology*, *1*, 3-47. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61936-6

Lange, K. (2009). Brain correlates of early auditory processing are attenuated by expectations for time and pitch. *Brain and Cognition*, *69*(1), 127-137. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.06.004

Laplane, D., Talairach, J., Meininger, V., Bancaud, J., & Orgogozo, J. M. (1977). Clinical consequences of corticectomies involving the supplementary motor area in man. *Journal of the Neurological Sciences*, *34*(3), 301-314. https://doi.org/10.1016/0022-510x(77)90148-4

Lappe, M., Jenkin, M., & Harris, L. R. (2007). Travel distance estimation from visual motion by leaky path integration. *Experimental Brain Research*, *180*(1), 35-48. https://doi.org/10.1007/s00221-006-0835-6

Lara, A. H., Elsayed, G. F., Zimnik, A. J., Cunningham, J. P., & Churchland, M. M. (2018). Conservation of preparatory neural events in monkey motor cortex regardless of how movement is initiated. *eLife*, *7*, e31826. https://doi.org/10.7554/eLife.31826

Lee, W. A., Buchanan, T. S., & Rogers, M. W. (1987). Effects of arm acceleration and behavioral conditions on the organization of postural adjustments during arm flexion. *Experimental Brain Research*, *66*(2), 257-270. https://doi.org/10.1007/BF00243303

Lejeune, H., & Wearden, J. H. (2009). Vierordt's The Experimental Study of the Time Sense (1868) and its legacy. *European Journal of Cognitive Psychology*, *21*(6), 941-960. https://doi.org/10.1080/09541440802453006

Leonard, J. A., Gritsenko, V., Ouckama, R., & Stapley, P. J. (2011). Postural adjustments for online corrections of arm movements in standing humans. *Journal of Neurophysiology*, *105*(5), 2375-2388. https://doi.org/10.1152/jn.00944.2010

Lewis, P. A., Wing, A. M., Pope, P. A., Praamstra, P., & Miall, R. C. (2004). Brain activity correlates differentially with increasing temporal complexity of rhythms during initialisation, synchronisation, and continuation phases of paced finger tapping. *Neuropsychologia*, *42*(10), 1301-1312. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.03.001

Liang, Y., Xu, T., Qi, S., Cao, X., Yeung, E. H. K., & Hu, Y. (2022). Non-age-related gait kinematics and kinetics in the elderly. *BMC Musculoskeletal Disorders*, *23*(1), 623. https://doi.org/10.1186/s12891-022-05577-2

Ma, W. J., Beck, J. M., Latham, P. E., & Pouget, A. (2006). Bayesian inference with probabilistic population codes. *Nature Neuroscience*, *9*(11), 1432-1438. https://doi.org/10.1038/nn1790

Macar, F., Vidal, F., & Casini, L. (1999). The supplementary motor area in motor and sensory timing : Evidence from slow brain potential changes. *Experimental Brain Research*, *125*(3), 271-280. https://doi.org/10.1007/s002210050683

Manning, F., & Schutz, M. (2013). “Moving to the beat” improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, *20*(6), 1133-1139. https://doi.org/10.3758/s13423-013-0439-7

Marques, A., Marconcin, P., Werneck, A. O., Ferrari, G., Gouveia, É. R., Kliegel, M., Peralta, M., & Ihle, A. (2021). Bidirectional Association between Physical Activity and Dopamine Across Adulthood—A Systematic Review. *Brain Sciences*, *11*(7), 829. https://doi.org/10.3390/brainsci11070829

Matell, M. S., & Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing : Coincidence detection of oscillatory processes. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *21*(2), 139-170. https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.06.012

Mattes, S., & Ulrich, R. (1998). Directed attention prolongs the perceived duration of a brief stimulus. *Perception & Psychophysics*, *60*(8), 1305-1317. https://doi.org/10.3758/bf03207993

Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2014). Time perception : The bad news and the good. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, *5*(4), 429-446. https://doi.org/10.1002/wcs.1298

Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016). Temporal cognition : Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin*, *142*(8), 865-907. https://doi.org/10.1037/bul0000045

McCone, H., Butler, J. S., & O’Connell, R. G. (2023). *Signatures of time interval reproduction in the human electroencephalogram (EEG)* (p. 2023.12.11.571138). bioRxiv. https://doi.org/10.1101/2023.12.11.571138

McNamee, D., & Wolpert, D. M. (2019). Internal Models in Biological Control. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, *2*(Volume 2, 2019), 339-364. https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105206

Meck, W. H. (2005). Neuropsychology of timing and time perception. *Brain and Cognition*, *58*(1), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.09.004

Meeusen, R., & Piacentini, M. (2001). Exercise and Neurotransmission : A Window to the Future? *European Journal of Sport Science*, *1*(1), 1-12. https://doi.org/10.1080/17461390100071103

Menceloglu, M., Grabowecky, M., & Suzuki, S. (2020). Rhythm Violation Enhances Auditory-Evoked Responses to the Extent of Overriding Sensory Adaptation in Passive Listening. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *32*(9), 1654-1671. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01578

Merchant, H., & de Lafuente, V. (2014). Introduction to the neurobiology of interval timing. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *829*, 1-13. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1782-2_1

Merchant, H., Harrington, D. L., & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience*, *36*, 313-336. https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062012-170349

Merchant, H., Pérez, O., Zarco, W., & Gámez, J. (2013). Interval tuning in the primate medial premotor cortex as a general timing mechanism. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *33*(21), 9082-9096. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5513-12.2013

Merchant, H., & Yarrow, K. (2016). How the motor system both encodes and influences our sense of time. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *8*, 22-27. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.01.006

Merchant, H., Zarco, W., & Prado, L. (2008a). Do We Have a Common Mechanism for Measuring Time in the Hundreds of Millisecond Range? Evidence From Multiple-Interval Timing Tasks. *Journal of Neurophysiology*, *99*(2), 939-949. https://doi.org/10.1152/jn.01225.2007

Merchant, H., Zarco, W., & Prado, L. (2008b). Do we have a common mechanism for measuring time in the hundreds of millisecond range? Evidence from multiple-interval timing tasks. *Journal of Neurophysiology*, *99*(2), 939-949. https://doi.org/10.1152/jn.01225.2007

Mitani, K., & Kashino, M. (2016). Self-Produced Time Intervals Are Perceived as More Variable and/or Shorter Depending on Temporal Context in Subsecond and Suprasecond Ranges. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *10*, 19. https://doi.org/10.3389/fnint.2016.00019

Miura, A., Fujii, S., Okano, M., Kudo, K., & Nakazawa, K. (2018). Upper rate limits for one-to-one auditory-motor coordination involving whole-body oscillation : A study of street dancers and non-dancers. *The Journal of Experimental Biology*, *221*, jeb.179457. https://doi.org/10.1242/jeb.179457

Molet, M., Alessandri, J., & Zentall, T. R. (2011). Subjective time : Cognitive and physical secondary tasks affect timing differently. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *64*(7), 1344-1353. https://doi.org/10.1080/17470218.2011.552728

Mondok, C., & Wiener, M. (2023). Selectivity of timing : A meta-analysis of temporal processing in neuroimaging studies using activation likelihood estimation and reverse inference. *Frontiers in Human Neuroscience*, *16*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.1000995

Monfort, V., Pfeuty, M., Masson, I., Kop, J.-L., Brissart, H., & Maillard, L. (2022). Preserved time but altered numerosity processing in epileptic patients with postoperative lesion in the inferior frontal gyrus. *Brain and Cognition*, *160*, 105865. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2022.105865

Morash, V., Bai, O., Furlani, S., Lin, P., & Hallett, M. (2008). Classifying EEG signals preceding right hand, left hand, tongue, and right foot movements and motor imageries.

Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, *119*(11), 2570-2578. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.08.013

Morasso, P. (1981). Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, *42*(2), 223-227. https://doi.org/10.1007/BF00236911

Morrone, M. C., Ross, J., & Burr, D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience*, *8*(7), 950-954. https://doi.org/10.1038/nn1488

Motanis, H., Seay, M. J., & Buonomano, D. V. (2018). Short-Term Synaptic Plasticity as a Mechanism for Sensory Timing. *Trends in Neurosciences*, *41*(10), 701-711. https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.08.001

Müller, G., Salem, A., & Schöllhorn, W. I. (2025). Effects of complex whole-body movements on EEG activity : A scoping review. *Frontiers in Psychology*, *16*, 1547022. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1547022

Muller, T., & Nobre, A. C. (2014). Perceiving the passage of time : Neural possibilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1326*(1), 60-71. https://doi.org/10.1111/nyas.12545

Musall, S., Kaufman, M. T., Juavinett, A. L., Gluf, S., & Churchland, A. K. (2019). Single-trial neural dynamics are dominated by richly varied movements. *Nature Neuroscience*, *22*(10), 1677-1686. https://doi.org/10.1038/s41593-019-0502-4

Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences*, *13*(2), 201-233. https://doi.org/10.1017/S0140525X00078407

Naghibi, N., Jahangiri, N., Khosrowabadi, R., Eickhoff, C. R., Eickhoff, S. B., Coull, J. T., & Tahmasian, M. (2024). Embodying Time in the Brain : A Multi-Dimensional Neuroimaging Meta-Analysis of 95 Duration Processing Studies. *Neuropsychology Review*, *34*(1), 277-298. https://doi.org/10.1007/s11065-023-09588-1

Nana-Ibrahim, S., Vieilledent, S., Leroyer, P., Viale, F., & Zattara, M. (2008). Target size modifies anticipatory postural adjustments and subsequent elementary arm pointing. *Experimental Brain Research*, *184*(2), 255-260. https://doi.org/10.1007/s00221-007-1178-7

Nani, A., Manuello, J., Liloia, D., Duca, S., Costa, T., & Cauda, F. (2019). The Neural Correlates of Time : A Meta-analysis of Neuroimaging Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *31*(12), 1796-1826. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01459

Nazari, M. A., Caria, A., & Soltanlou, M. (2017). Time for action versus action in time : Time estimation differs between motor preparation and execution. *Journal of Cognitive Psychology*. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20445911.2016.1232724

Ng, K. K., & Penney, T. B. (2014). Probing Interval Timing with Scalp-Recorded Electroencephalography (EEG). In H. Merchant & V. de Lafuente (Éds.), *Neurobiology of Interval Timing* (p. 187-207). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1782-2_11

Niell, C. M., & Stryker, M. P. (2010). Modulation of Visual Responses by Behavioral State in Mouse Visual Cortex. *Neuron*, *65*(4), 472-479. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.01.033

Noguchi, Y., & Kakigi, R. (2006). Time representations can be made from nontemporal information in the brain : An MEG study. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *16*(12), 1797-1808. https://doi.org/10.1093/cercor/bhj117

O'Boyle, D. J., Freeman, J. S., & Cody, F. W. J. (1996). The accuracy and precision of timing of self-paced, repetitive movements in subjects with Parkinson's disease. *Brain*, *119*(1), 51-70. https://doi.org/10.1093/brain/119.1.51

Occelli, V., Spence, C., & Zampini, M. (2011). Audiotactile interactions in temporal perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(3), 429-454. https://doi.org/10.3758/s13423-011-0070-4

Ogden, R. S., Turner, F., & Pawling, R. (2021). *An Absence of a Relationship between Overt Attention and Emotional Distortions to Time : An Eye Movement Study*. https://doi.org/10.1163/22134468-bja10021

Oostwoud Wijdenes, L., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2011). Fast and fine-tuned corrections when the target of a hand movement is displaced. *Experimental Brain Research*, *214*(3), 453-462. https://doi.org/10.1007/s00221-011-2843-4

Oostwoud Wijdenes, L., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2014). Analysis of methods to determine the latency of online movement adjustments. *Behavior Research Methods*, *46*(1), 131-139. https://doi.org/10.3758/s13428-013-0349-7

Paillard, J. (1996). Fast and slow feedback loops for the visual correction of spatial errors in a pointing task : A reappraisal. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, *74*(4), 401-417. https://doi.org/10.1139/y96-033

Papaxanthis, C., Pozzo, T., & Schieppati, M. (2003). Trajectories of arm pointing movements on the sagittal plane vary with both direction and speed. *Experimental Brain Research*, *148*(4), 498-503. https://doi.org/10.1007/s00221-002-1327-y

Parasuraman, R. (1978). Auditory evoked potentials and divided attention. *Psychophysiology*, *15*(5), 460-465. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1978.tb01416.x

Paton, J. J., & Buonomano, D. V. (2018). The Neural Basis of Timing : Distributed Mechanisms for Diverse Functions. *Neuron*, *98*(4), 687-705. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.03.045

Petersen, T. H., Rosenberg, K., Petersen, N. C., & Nielsen, J. B. (2009). Cortical involvement in anticipatory postural reactions in man. *Experimental Brain Research*, *193*(2), 161-171. https://doi.org/10.1007/s00221-008-1603-6

Petter, E. A., Lusk, N. A., Hesslow, G., & Meck, W. H. (2016). Interactive roles of the cerebellum and striatum in sub-second and supra-second timing : Support for an initiation,

continuation, adjustment, and termination (ICAT) model of temporal processing. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *71*, 739-755. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.10.015

Petzschner, F. H., Glasauer, S., & Stephan, K. E. (2015). A Bayesian perspective on magnitude estimation. *Trends in Cognitive Sciences*, *19*(5), 285-293. https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.03.002

Pfaff, M., & Casteran, M. (2024). *Identification of whole-body reaching movement phenotypes in young and older active adults : An unsupervised machine learning approach* (p. 2024.07.09.600023). bioRxiv. https://doi.org/10.1101/2024.07.09.600023

Pfeuty, M., Monfort, V., Klein, M., Krieg, J., Collé, S., Colnat-Coulbois, S., Brissart, H., & Maillard, L. (2019). Role of the supplementary motor area during reproduction of supra-second time intervals : An intracerebral EEG study. *NeuroImage*, *191*, 403-420. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.01.047

Polich, J., & Kok, A. (1995). Cognitive and biological determinants of P300 : An integrative review. *Biological Psychology*, *41*(2), 103-146. https://doi.org/10.1016/0301-0511(95)05130-9

Popa, L. S., & Ebner, T. J. (2019). Cerebellum, Predictions and Errors. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, *12*. https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00524

Pouthas, V. (1985). Timing Behavior in Young Children : A Developmental Approach to Conditioned Spaced Responding. In J. A. Michon & J. L. Jackson (Éds.), *Time, Mind, and Behavior* (p. 100-109). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70491-8_6

Pozzo, T., Berthoz, A., & Popov, C. (1995). Effect of weightlessness on posture and movement control during a whole body reaching task. *Acta Astronautica*, *36*(8), 727-732. https://doi.org/10.1016/0094-5765(95)00163-8

Pozzo, T., Ouamer, M., & Gentil, C. (2001). Simulating mechanical consequences of voluntary movement upon whole-body equilibrium : The arm-raising paradigm revisited. *Biological Cybernetics*, *85*(1), 39-49. https://doi.org/10.1007/PL00007995

Prablanc, C., & Martin, O. (1992). Automatic control during hand reaching at undetected two-dimensional target displacements. *Journal of Neurophysiology*, *67*(2), 455-469. https://doi.org/10.1152/jn.1992.67.2.455

Press, C., Berlot, E., Bird, G., Ivry, R., & Cook, R. (2014). Moving time : The influence of action on duration perception. *Journal of Experimental Psychology. General*, *143*(5), 1787-1793. https://doi.org/10.1037/a0037650

Rammsayer, T., & Grondin, S. (2000). Psychophysics of Human Timing. In *Time and the Brain*. CRC Press.

Ravi, D. K., Heimhofer, C. C., Taylor, W. R., & Singh, N. B. (2021). Adapting Footfall Rhythmicity to Auditory Perturbations Affects Resilience of Locomotor Behavior : A Proof-of-Concept Study. *Frontiers in Neuroscience*, *15*. https://doi.org/10.3389/fnins.2021.678965

Remijn, G., Hasuo, E., Fujihira, H., & Morimoto, S. (2014). An introduction to the measurement of auditory event-related potentials (ERPs). *Acoustical Science and Technology*, *35*, 229-242. https://doi.org/10.1250/ast.35.229

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization : A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*(6), 969-992. https://doi.org/10.3758/BF03206433

Rosenbaum, D. A. (2009). *Human Motor Control*. Academic Press.

Ross, J. M., Iversen, J. R., & Balasubramaniam, R. (2018). The Role of Posterior Parietal Cortex in Beat-based Timing Perception : A Continuous Theta Burst Stimulation Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *30*(5), 634-643. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01237

Rouder, J. N., Morey, R. D., Speckman, P. L., & Province, J. M. (2012). Default Bayes factors for ANOVA designs. *Journal of Mathematical Psychology*, *56*(5), 356-374. https://doi.org/10.1016/j.jmp.2012.08.001

Salman, M. S. (2002). The cerebellum : It's about time! But timing is not everything--New insights into the role of the cerebellum in timing motor and cognitive tasks. *Journal of Child Neurology*, *17*(1), 1-9. https://doi.org/10.1177/088307380201700101

Sawacha, Z., Sartor, C. D., Yi, L. C., Guiotto, A., Spolaor, F., & Sacco, I. C. N. (2020). Clustering classification of diabetic walking abnormalities : A new approach taking into account intralimb coordination patterns. *Gait & Posture*, *79*, 33-40. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.016

Sayali, C., Özoglu, E., Menceloglu, M., Canbeyli, R., & Balci, F. (2018). Effect of Acute Physical Activity on Interval Timing. *Timing & Time Perception*, *6*. https://doi.org/10.1163/22134468-00002098

Schafer, E. W. (1982). Neural adaptability : A biological determinant of behavioral intelligence. *The International Journal of Neuroscience*, *17*(3), 183-191. https://doi.org/10.3109/00207458208985922

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., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T. (1979). Motor-output variability : A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, *47*(5), 415-451.

Schneider, S., Münte, T., Rodriguez-Fornells, A., Sailer, M., & Altenmüller, E. (2010). Music-supported training is more efficient than functional motor training for recovery of fine motor skills in stroke patients. *Music Perception*, *27*(4), 271-280. https://doi.org/10.1525/mp.2010.27.4.271

Schubotz, R. I. (2007). Prediction of external events with our motor system : Towards a new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(5), 211-218. https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.02.006

Schwartze, M., Stockert, A., & Kotz, S. A. (2015). Striatal contributions to sensory timing : Voxel-based lesion mapping of electrophysiological markers. *Cortex*, *71*, 332-340. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.07.016

Scott Kelso, J. A., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes. *Journal of Motor Behavior*, *13*(4), 226-261. https://doi.org/10.1080/00222895.1981.10735251

Seilheimer, R. L., Rosenberg, A., & Angelaki, D. E. (2014). Models and processes of multisensory cue combination. *Current Opinion in Neurobiology*, *25*, 38-46. https://doi.org/10.1016/j.conb.2013.11.008

Sgouramani, H., & Vatakis, A. (2014). « Flash » dance : How speed modulates percieved duration in dancers and non-dancers. *Acta Psychologica*, *147*, 17-24. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.06.009

Shadmehr, R., Smith, M. A., & Krakauer, J. W. (2010). Error Correction, Sensory Prediction, and Adaptation in Motor Control. *Annual Review of Neuroscience*, *33*(Volume 33, 2010), 89-108. https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-060909-153135

Shiratori, T., & Aruin, A. (2007). Modulation of anticipatory postural adjustments associated with unloading perturbation : Effect of characteristics of a motor action. *Experimental Brain Research*, *178*(2), 206-215. https://doi.org/10.1007/s00221-006-0725-y

Sohn, H., Narain, D., Meirhaeghe, N., & Jazayeri, M. (2019). Bayesian Computation through Cortical Latent Dynamics. *Neuron*, *103*(5), 934-947.e5. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.06.012

Spapé, M. M., Serrien, D. J., & Ravaja, N. (2023). 3-2-1, action ! A combined motor control-temporal reproduction task shows intentions, motions, and consequences alter time perception. *Heliyon*, *9*(9), e19728. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19728

Spencer, R. M. C., Zelaznik, H. N., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2003). Disrupted timing of discontinuous but not continuous movements by cerebellar lesions. *Science (New York, N.Y.)*, *300*(5624), 1437-1439. https://doi.org/10.1126/science.1083661

Stapley, P. J., Pozzo, T., Cheron, G., & Grishin, A. (1999). Does the coordination between posture and movement during human whole-body reaching ensure center of mass stabilization? *Experimental Brain Research*, *129*(1), 134-146. https://doi.org/10.1007/s002210050944

Stevens, S. S. (1975). *Psychophysics : Introduction to its perceptual, neural, and social prospects* (p. v, 329). John Wiley & Sons.

Stevens, S. S., & Galanter, E. H. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, *54*(6), 377-411. https://doi.org/10.1037/h0043680

Su, Y.-H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, *76*(3), 373-382. https://doi.org/10.1007/s00426-011-0346-3

Taatgen, N. A., van Rijn, H., & Anderson, J. (2007). An integrated theory of prospective time interval estimation : The role of cognition, attention, and learning. *Psychological Review*, *114*(3), 577-598. https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.577

Taatgen, N., & van Rijn, H. (2011). Traces of times past : Representations of temporal intervals in memory. *Memory & Cognition*, *39*(8), 1546-1560. https://doi.org/10.3758/s13421-011-0113-0

Tanaka, Y., & Saga, N. (2019). Frequency-Dependent EEG Corresponding to EMG under Voluntary Movement. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, *14*(3), 501-502. https://doi.org/10.1002/tee.22833

Tang, C., Xu, Z., Occhipinti, E., Yi, W., Xu, M., Kumar, S., Virk, G. S., Gao, S., & Occhipinti, L. G. (2023). From brain to movement : Wearables-based motion intention prediction across the human nervous system. *Nano Energy*, *115*, 108712. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108712

Tanji, J. (1994). The supplementary motor area in the cerebral cortex. *Neuroscience Research*, *19*(3), 251-268. https://doi.org/10.1016/0168-0102(94)90038-8

Tanji, J. (1996). New concepts of the supplementary motor area. *Current Opinion in Neurobiology*, *6*(6), 782-787. https://doi.org/10.1016/S0959-4388(96)80028-6

Tanji, J., & Kurata, K. (1985). Contrasting neuronal activity in supplementary and precentral motor cortex of monkeys. I. Responses to instructions determining motor responses to forthcoming signals of different modalities. *Journal of Neurophysiology*, *53*(1), 129-141. https://doi.org/10.1152/jn.1985.53.1.129

Teghil, A., & Wittmann, M. (2025). How the body and brain process time. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *179*, 106416. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2025.106416

Terhune, D. B., Sullivan, J. G., & Simola, J. M. (2016). Time dilates after spontaneous blinking. *Current Biology*, *26*(11), R459-R460. https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.010

Terrier, P. (2019). Complexity of human walking : The attractor complexity index is sensitive to gait synchronization with visual and auditory cues. *PeerJ*, *7*, e7417. https://doi.org/10.7717/peerj.7417

Thomas, E., French, R., Alizee, G., & Coull, J. T. (2019). Having your cake and eating it : Faster responses with reduced muscular activation while learning a temporal interval. *Neuroscience*, *410*, 68-75. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.05.003

Thomas, J. S., Corcos, D. M., & Hasan, Z. (2005). Kinematic and kinetic constraints on arm, trunk, and leg segments in target-reaching movements. *Journal of Neurophysiology*, *93*(1), 352-364. https://doi.org/10.1152/jn.00582.2004

Todorov, E. (2004). Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neuroscience*, *7*(9), 907-915. https://doi.org/10.1038/nn1309

Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, *5*(11), 1226-1235. https://doi.org/10.1038/nn963

Todorovic, A., & de Lange, F. P. (2012). Repetition suppression and expectation suppression are dissociable in time in early auditory evoked fields. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *32*(39), 13389-13395. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2227-12.2012

Tolambiya, A., Chiovetto, E., Pozzo, T., & Thomas, E. (2012). Modulation of anticipatory postural activity for multiple conditions of a whole-body pointing task. *Neuroscience*, *210*, 179-190. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.02.050

Tomassini, A., Gori, M., Baud-Bovy, G., Sandini, G., & Morrone, M. C. (2014). Motor commands induce time compression for tactile stimuli. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *34*(27), 9164-9172. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2782-13.2014

Tomassini, A., Maris, E., Hilt, P., Fadiga, L., & D'Ausilio, A. (2020). Visual detection is locked to the internal dynamics of cortico-motor control. *PLOS Biology*, *18*(10), e3000898. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000898

Tomassini, A., & Morrone, M. C. (2016). Perceived visual time depends on motor preparation and direction of hand movements. *Scientific Reports*, *6*(1), 27947. https://doi.org/10.1038/srep27947

Tomyta, K., Katahira, K., & Ohira, H. (2023). Effects of interoceptive accuracy on timing control in the synchronization tapping task. *Frontiers in Neuroscience*, *16*, 907836. https://doi.org/10.3389/fnins.2022.907836

Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval : Implications for a model of the « internal clock ». *Psychological Monographs: General and Applied*, *77*(13), 1-31. https://doi.org/10.1037/h0093864

Tse, P. U., Intriligator, J., Rivest, J., & Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, *66*(7), 1171-1189. https://doi.org/10.3758/bf03196844

Ulrich, R., Bausenhart, K., & Wearden, J. H. (2022). *Weber's Law for Timing and Time Perception : Reconciling the Poisson Clock with Scalar Expectancy Theory (SET)*. https://doi.org/10.1163/22134468-bja10055

Ünver, R. (2023). Prospective and retrospective timing processes : Theories and methods. *Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar*, *15*(4), 613-621. https://doi.org/10.18863/pgy.1184137

van Rijn, H., Gu, B.-M., & Meck, W. H. (2014). Dedicated clock/timing-circuit theories of time perception and timed performance. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *829*, 75-99. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1782-2_5

van Rijn, H., & Taatgen, N. A. (2008). Timing of multiple overlapping intervals : How many clocks do we have? *Acta Psychologica*, *129*(3), 365-375. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.09.002

van Wassenhove, V., & Lecoutre, L. (2015). Duration estimation entails predicting when. *NeuroImage*, *106*, 272-283. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.11.005

Veerman, M. M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2008). The latency for correcting a movement depends on the visual attribute that defines the target. *Experimental Brain Research.*

Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale, *187*(2), 219-228. https://doi.org/10.1007/s00221-008-1296-x

Vidal, F., Bonnet, M., & Macar, F. (1995). Programming the duration of a motor sequence : Role of the primary and supplementary motor areas in man. *Experimental Brain Research*, *106*(2), 339-350. https://doi.org/10.1007/BF00241129

Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. H. Laupp.

Viviani, P., & Laissard, G. (1991). Timing control in motor sequences. In *The development of timing control and temporal organization in coordinated action : Invariant relative timing, rhythms and coordination* (p. 1-36). North-Holland. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)60758-X

Volkinburg, H. V., & Balsam, P. (2014). Effects of Emotional Valence and Arousal on Time Perception. *Timing & Time Perception (Leiden, Netherlands)*, *2*(3), 360. https://doi.org/10.1163/22134468-00002034

Voluntary Movement : The Parietal and Premotor Cortex. (2014). In *Principles of Neural Science, Fifth Edition* (Vol. 1-Book, Section). McGraw-Hill Education. neurology.mhmedical.com/content.aspx?aid=1101681407

Wang, J., Narain, D., Hosseini, E. A., & Jazayeri, M. (2018). Flexible timing by temporal scaling of cortical responses. *Nature Neuroscience*, *21*(1), 102-110. https://doi.org/10.1038/s41593-017-0028-6

Wearden, J. (2016). *The Psychology of Time Perception*. Palgrave Macmillan.

Wearden, J. H., & Ogden, R. S. (2021). *Filled-Duration Illusions*. https://doi.org/10.1163/22134468-bja10040

Wiener, M., Thompson, J. C., & Coslett, H. B. (2014). Continuous Carryover of Temporal Context Dissociates Response Bias from Perceptual Influence for Duration. *PLOS ONE*, *9*(6), e100803. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100803

Wiener, M., Turkeltaub, P., & Coslett, H. B. (2010a). The image of time : A voxel-wise meta-analysis. *NeuroImage*, *49*(2), 1728-1740. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.064

Wiener, M., Turkeltaub, P. E., & Coslett, H. B. (2010b). Implicit timing activates the left inferior parietal cortex. *Neuropsychologia*, *48*(13), 3967-3971. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.014

Wiener, M., Zhou, W., Bader, F., & Joiner, W. (2019). Movement Improves the Quality of Temporal Perception and Decision Making. *eneuro*, *6*, ENEURO.0042-19.2019. https://doi.org/10.1523/ENEURO.0042-19.2019

Wittmann, M., Simmons, A. N., Aron, J. L., & Paulus, M. P. (2010). Accumulation of neural activity in the posterior insula encodes the passage of time. *Neuropsychologia*, *48*(10), 3110-3120. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.023

Yabe, Y., & Goodale, M. A. (2015). Time flies when we intend to act : Temporal distortion in a Go/No-Go task. *The Journal of Neuroscience*, *35*(12), 5023-5029. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4386-14.2015

Yamanishi, J., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, *37*(4), 219-225. https://doi.org/10.1007/BF00337040

Yarrow, K., & Rothwell, J. C. (2003). Manual Chronostasis : Tactile Perception Precedes Physical Contact. *Current Biology*, *13*(13), 1134-1139. https://doi.org/10.1016/S0960-9822(03)00413-5

Yokosaka, T., Kuroki, S., Nishida, S., & Watanabe, J. (2015). Apparent Time Interval of Visual Stimuli Is Compressed during Fast Hand Movement. *PLoS ONE*, *10*(4), e0124901. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124901

Yon, D., Edey, R., Ivry, R. B., & Press, C. (2017). Time on your hands : Perceived duration of sensory events is biased toward concurrent actions. *Journal of Experimental Psychology. General*, *146*(2), 182-193. https://doi.org/10.1037/xge0000254

Yon, D., Gilbert, S. J., de Lange, F. P., & Press, C. (2018). Action sharpens sensory representations of expected outcomes. *Nature Communications*, *9*(1), 4288. https://doi.org/10.1038/s41467-018-06752-7

Zakay, D., & Block, R. A. (1995). *An Attentional·Gate Model of Prospective Time Estimation*.

Zakay, D., & Block, R. A. (2004a). Prospective and retrospective duration judgments : An executive-control perspective. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *64*(3), 319-328. https://doi.org/10.55782/ane-2004-1516

Zakay, D., & Block, R. A. (2004b). Prospective and retrospective duration judgments : An executive-control perspective. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, *64*(3), 319-328. https://doi.org/10.55782/ane-2004-1516

Zelaznik, H. N., Spencer, R. M. C., & Ivry, R. B. (2002). Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *28*(3), 575-588. https://doi.org/10.1037//0096-1523.28.3.575

Zhang, Y., Brenner, E., Duysens, J., Verschueren, S., & Smeets, J. B. J. (2018). Postural responses to target jumps and background motion in a fast pointing task. *Experimental Brain Research*, *236*(6), 1573-1581. https://doi.org/10.1007/s00221-018-5222-6

Zhou, S., Masmanidis, S. C., & Buonomano, D. V. (2020). Neural Sequences as an Optimal Dynamical Regime for the Readout of Time. *Neuron*, *108*(4), 651-658.e5. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.08.020

Zimmermann, E., & Cicchini, G. M. (2020). Temporal Context affects interval timing at the perceptual level. *Scientific Reports*, *10*(1), 8767. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65609-6

Annexes

Annexe 1 : Acceptation pour publication dans la revue Psychological Research

Psychological Research (2025) 89:179
https://doi.org/10.1007/s00426-025-02213-1

RESEARCH

From finger to whole-body movements: How movement type affects our sense of time

Michel Pfaff[1] · Micha Pfeuty[2] · Vincent Monfort[1] · Elizabeth Thomas[3] · Matthieu Casteran[1,4]

Received: 4 June 2025 / Accepted: 16 November 2025
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2025

Abstract
Interval timing is essential for adapting behaviour in dynamic environments. While previous research has shown that time perception is influenced by movement, the role of movement type in this interaction remains poorly understood. The present study aimed to further investigate this interaction, by comparing temporal performance (i.e., temporal accuracy and precision) across two movement types: whole-body reaching (WBR) movements and finger movements. Fourteen participants reproduced time intervals while performing both movement types using five target durations centred around the natural duration of the WBR movement. We observed lower temporal variability with WBR movements compared to finger movements. This can be explained by a Bayesian cue combination framework or an increase of the pacemaker rate within the Scalar Expectancy Theory. Regarding temporal accuracy, intervals were over-reproduced with finger movements compared to WBR movements, possibly due to fluctuations in attentional allocation during finger movements or an increase of the pacemaker rate during WBR movements. Additionally, within the WBR condition, shorter intervals were over-reproduced, which may reflect either subjective time compression induced by faster movements, or the influence of biomechanical constraints. These findings extend current models by suggesting that motor execution actively shapes temporal performance, serving as more than just a final output mechanism. This could hold implications for training and rehabilitation strategies, where engaging whole-body movements may help reduce temporal variability.

Keywords Interval timing · Whole-body reaching · Movement · Time perception

Annexe 2 : Analyse complémentaire de l'expérimentation 2

Coefficient of variation				
Fixed Effects Omnibus Tests				
	F	**df**	**df (res)**	**p**
IRT	0.122	1	35.9	0.729
Durée	1.103	2	843.1	0.332
Mouvement	22.41	1	843.1	**<.001**
Durée ✻ Mouvement	2.116	2	843	0.121
IRT ✻ Durée	5.154	2	843	**0.006**
IRT ✻ Mouvement	0.322	1	843	0.571
IRT ✻ Durée ✻ Mouvement	0.746	2	843	0.475
ANOVA for Simple Effects of IRT				
Moderator				
Durée	**F**	**Num df**	**Den df**	**p**
900	1.988	1	46.6	0.165
1200	0	1	46.2	0.99
1600	0.195	1	46.1	0.661

Tableau 1 : relation entre l'indice de réponse temporelle (IRT) et le coefficient de variation issus de la tâche de reproduction temporelle.

Le modèle linéaire mixte ne met en évidence aucun effet significatif de la covariable IRT, mais révèle une interaction significative IRT ✻ Durée. Toutefois, l'analyse des effets simples ne montre aucune relation significative. Ces résultats convergent avec ceux de nos analyses corrélationnelles, ne mettant en évidence aucune association significative entre l'IRT et la variabilité temporelle d'une tâche de reproduction.

Ratio IR/IC				
Fixed Effects Omnibus Tests				
	F	**df**	**df (res)**	**p**
IRT	0.16	1	36	0.691
Durée	66.964	2	5389	**<.001**
Mouvement	5.846	1	5389	**0.016**
Durée ✻ Mouvement	35.208	2	5389	**<.001**
IRT ✻ Durée	13.918	2	5389	**<.001**
IRT ✻ Mouvement	14.061	1	5389	**<.001**
IRT ✻ Durée ✻ Mouvement	0.236	2	5389	0.79
ANOVA for Simple Effects of IRT				
Moderator				
Durée	**F**	**Num df**	**Den df**	**p**
900	0.915	1	38.1	0.345
1200	0.482	1	38	0.492
1600	0.217	1	38	0.644
ANOVA for Simple Effects of IRT				
Moderator				
Mouvement	**F**	**Num df**	**Den df**	**p**
Finger	0.706	1	37	0.406
WBR	0.002	1	37	0.964

Tableau 2 : relation entre l'indice de réponse temporelle (IRT) et le ratio IR/IC issus de la tâche de reproduction temporelle.

Le modèle linéaire mixte ne met en évidence aucun effet significatif de la covariable IRT, mais révèle une interaction significative IRT ✻ Durée et IRT ✻ Mouvement. Toutefois, l'analyse des effets simples ne montre aucune relation significative. Ces résultats convergent avec ceux de nos analyses corrélationnelles, ne mettant en évidence aucune association significative entre l'IRT et la précision temporelle d'une tâche de reproduction.

Annexe 3 : Pfaff et Casteran (2024)

Identification of whole-body reaching movement phenotypes in young and older active adults: an unsupervised machine learning approach

Michel Pfaff, Matthieu Casteran

doi: https://doi.org/10.1101/2024.07.09.600023

This article is a preprint and has not been certified by peer review [**what does this mean?**].

Abstract

Studies reported age-related motor control modifications in whole-body movement in several aspects of spatiotemporal movement organization by comparing young and older adults. However, studies on motor control involve high complexity and high-dimensional data of different natures, in which machine learning has proved to be effective. Furthermore, conventional studies focus on comparisons of movement parameters based on a priori grouping, whereas unsupervised machine learning allows the identification of inherent groupings within the dataset. The current investigation was carried out by using the unsupervised machine learning on motor control features across age-groups. An important question was whether we could identify different movement patterns based on motor control features and whether they were age-dependent or independent. We investigated motor control parameters variations in a whole-body reaching movement across young and active older adults including woman and man (n=19). We applied the K-means clustering algorithm to segment the kinematic data (21 features) of all individuals. We propose a methodology applying the latest recommendations for clustering methods in the field of whole-body movement motor control. Analysis revealed two distinct motor control patterns which were age independent. The first pattern exhibited higher shoulder, ankle and knee angular excursions, along with a higher vertical velocity of center of mass (CoM), compared to the second pattern, which had higher hip and back angular excursions, along with a lower vertical velocity CoM. The clustering methodology demonstrated its effectiveness to identify distinct motor patterns based solely on motor control features independently of age-grouping.

Significance Statement

- K-means clustering algorithm enabled us to identify two distinct age-independent motor patterns: a first pattern with high shoulder, ankle and knee angular excursions, and vertical velocity of CoM; a second pattern with high hip and back angular excursions and low vertical velocity of CoM.
- Demonstrates how unsupervised machine learning can identify motor patterns and proposes a methodology to apply it in the field of whole-body movement motor control.
- Proves the complementary contribution of unsupervised machine learning to conventional approach for motor control studies, which enables to process the high complexity and dimensionality of movements.
- Advances understanding of motor behaviours through unsupervised machine learning analysis of whole-body reaching movements.

Résumé

L'objectif général de cette thèse était d'examiner l'interaction entre le mouvement d'atteinte du corps entier (WBR) et la perception du temps, ainsi que l'intégration d'un objectif temporel explicite dans l'organisation motrice, au travers de quatre études complémentaires. Deux études portant sur les performances temporelles lors de mouvements du doigt et de WBR dans une tâche de reproduction temporelle, montrent que le WBR est associé à une réduction de la variabilité temporelle et à un effet de tendance centrale comparativement aux mouvements de doigt. Ces résultats s'expliquent par la combinaison bayésienne d'indices, de la théorie du temps scalaire ainsi que de l'influence de caractéristiques propres au mouvement. Nous avons également évalué la valeur prédictive des capacités de perception du temps, quantifiées par le complexe N1–P2, pour les performances temporelles dans différentes tâches de timing moteur, montrant qu'il ne constitue pas un marqueur général du jugement temporel, mais plutôt un indice dépendant d'un contexte spécifique. Deux autres études portant sur un mouvement de WBR réalisé avec ou sans objectif temporel explicite révèlent d'une part que ce but temporel est intégré dès la phase de planification du mouvement et maintenu lors du contrôle en ligne du mouvement et, d'autre part, que pour des durées courtes et moyennes la préparation motrice joue un rôle déterminant pour la précision temporelle, tandis que pour des durées longues les mécanismes de correction en ligne deviennent prépondérants. Ces résultats étendent les modèles de contrôle moteur des mouvements d'atteinte du corps entier, en suggérant une intégration conjointe et dynamique des objectifs spatiaux et temporels.

Dans l'ensemble, ce travail, en articulant deux champs souvent étudiés séparément, met en évidence l'existence de relations étroites entre les mécanismes de jugement temporel et le contrôle moteur.

Mots-clés : perception du temps, contrôle moteur, whole-body reaching, mouvement

Abstract

The general goal of this thesis was to examine the interaction between whole-body reaching (WBR) movement and time perception, as well as the integration of an explicit temporal goal into motor organisation, across four complementary studies. Two studies comparing temporal performance between a finger movement and WBR movement in a time reproduction task show that WBR movement is associated with reduced temporal variability and a central tendency effect. These results can be accounted for within the Bayesian cue combination framework, the scalar timing theory, and the influence of movement-specific characteristics. We also evaluated the predictive value of time perception abilities, quantified by the N1–P2 complex, for temporal performance in different motor timing tasks, showing that it does not constitute a general marker of temporal judgment, but rather a context-dependent index. Two further studies examining WBR movement performed with or without an explicit temporal goal reveal, on the one hand, that this temporal goal is integrated in the movement preparation and maintained during online movement control and, on the other hand, that for short and intermediate durations motor preparation plays a determining role for temporal accuracy, whereas for longer durations online correction mechanisms become predominant. These findings extend motor control models of whole-body reaching movements by suggesting a joint and dynamic integration of spatial and temporal goals.

Overall, by considering two domains that are often studied separately, this thesis emphasizes the existence of close relationships between temporal judgment mechanisms and motor control.

Keywords: time perception, motor control, whole-body reaching, movement