

---

# Cinématique vs. cinétique : faut-il les dissocier pour optimiser l'apprentissage moteur ?

Lola Charbonnier\*<sup>1</sup>, Yannick Blandin<sup>1</sup>, Arnaud Decatoire<sup>2</sup>, Antoine Eon<sup>2</sup>, and Cécile Scotto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de recherches sur la cognition et l'apprentissage [UMR 7295] – Université de Poitiers = University of Poitiers, Centre National de la Recherche Scientifique – France

<sup>2</sup>Robotique, Biomécanique, Sport, Santé [Institut Pprime] – Département Génie Mécanique et Systèmes Complexes [Institut Pprime] – France

## Résumé

Introduction : L'apprentissage est un processus continu nous accompagnant tout au long de notre vie et nous permettant de nous adapter aux changements constants de notre environnement ainsi qu'aux changements intrinsèques, qu'ils soient progressifs (vieillesse) ou soudains (accidents). En rééducation, l'usage de dispositifs robotiques offrent des opportunités prometteuses pour le réapprentissage moteur (Reinkensmeyer & Patton, 2009) car ils permettent d'améliorer l'efficacité des apprentissages sensorimoteurs au-delà de ce qu'il est possible de faire avec des techniques et des protocoles conventionnels de rééducation. Toutefois les dispositifs robotiques actifs utilisés jusqu'à présent se concentrent principalement sur la trajectoire (cinématique) plutôt que sur les commandes motrices nécessaires (cinétique). Cette distinction entre cinématique et cinétique soulève une question fondamentale : peut-on réellement dissocier ces deux aspects dans l'apprentissage moteur ou sont-ils intrinsèquement liés dans le processus d'acquisition et de contrôle du mouvement ?

Méthode : Afin de tester cette hypothèse, nous avons modifié la marge d'erreur tolérée par un guidage robotique lors de l'apprentissage d'un mouvement complexe du bras, en utilisant un dispositif robotisé doté d'un contrôle en admittance (Decatoire, Eon, Laguillaumie, 2022). Une marge importante permet au sujet de faire l'expérience de la cinématique du mouvement sans avoir à produire les efforts requis, alors qu'une marge faible nécessite de produire ces efforts (cinétique) pour que le déplacement (cinématique) soit permis. Le jour 1, les participants de quatre groupes (n=16) ont effectué une session d'acquisition (six blocs de 15 essais) avec une marge d'erreur constante de 2 Nm (groupe Constant 2 Nm) ou 12 Nm (groupe Constant 12 Nm) ; ou avec une modification progressive de cette marge : de 12 à 2 Nm (groupe Marge-) ou de 2 à 12 Nm (groupe Marge+). Cette session d'acquisition a été réalisée avec un retour visuel continu représentant le couple produit par rapport au couple attendu, un feedback terminal de ces deux traces a également été présenté à la fin de chaque essai. Juste avant cette session d'acquisition ; les quatre groupes ont effectué un pré-test de cinq essais sans feedback visuel avec une marge moyenne de 7 Nm, après visualisation d'une vidéo du mouvement de référence effectué sur un dispositif de musculation. Le jour 2, cette même session expérimentale a été répétée dans les mêmes conditions mais sans visualisation de la vidéo de référence en amont (post-test).

Résultats : L'erreur quadratique (RMSE) entre le couple de référence et le couple produit par

---

\*Intervenant

le participant, nous permet d'évaluer l'apprentissage. Les données obtenues par l'ANOVA à mesures répétées suggèrent que les quatre groupes ont connu une amélioration de leurs performances entre le pré et le post-test ( $p < 0,05$ ). Toutefois l'ANOVA sur le taux d'amélioration (i.e.,  $(\text{post-pré})/\text{pré}$ ) a montré un apprentissage supérieur pour les groupes Marge+ (37%) et Marge- (34%) comparé au groupe Constant 12 Nm (13% ;  $p < 0,05$  pour les deux comparaisons). Comme le dispositif robotisé ralentissait le mouvement si le couple produit par le participant sortait de la marge d'erreur spécifiée (contrôle en admittance), nous avons également défini un critère temps (TC) qui indiquait à quel point le profil de couple produit par le participant était temporellement proche du profil de référence. Les données obtenues pour ce paramètre convergent avec celle de la RMSE, indiquant une amélioration des performances entre pré et post-test pour les quatre groupes ( $p < 0,05$ ) et un taux d'amélioration supérieur pour les groupes Marge+ (50%) et Marge- (46%) comparé au groupe Constant 12 Nm (13% ;  $p < 0,005$  &  $p < 0,01$  ; respectivement).

Discussion / Conclusion : Nos résultats soutiennent donc l'hypothèse selon laquelle la variation de la marge d'erreur favorise l'apprentissage en offrant un accès simultané à une représentation extrinsèque (cinématique) et intrinsèque (cinétique) du mouvement (Krakauer et al., 1999). Ces deux paramètres étant étroitement liés, ils ne devraient pas être dissociés dans l'apprentissage d'un geste moteur complexe.

#### Références :

Decatoire, A., Eon, A., & Laguillaumie, P. (2022). *Device for physical rehabilitation, training or preparation* (WO 2022/084283 A1).

Krakauer, J. W., Ghilardi, M.-F., & Ghez, C. (1999). Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nature Neuroscience*, 2(11), 1026-1031.

Reinkensmeyer, D. J., & Patton, J. L. (2009). Can Robots Help the Learning of Skilled Actions? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 37(1), 43-51.