

## Conception d'un dispositif mécatronique d'aide à l'apprentissage d'un geste et au renforcement musculaire spécifique

MONNET Tony, EON Antoine, DECATOIRE Arnaud

### Résumé

Ce sujet, visant au développement d'un dispositif mécatronique innovant d'aide à l'apprentissage moteur. Il s'agit de mettre au point une interaction entre un humain et un robot tenant compte de la cinématique et de la dynamique d'un mouvement à apprendre par l'humain. Les applications ciblées avec un tel développement relèvent aussi bien de l'apprentissage de mouvement sportif (performance de haut niveau) que du retour à une motricité « normale » suite à un traumatisme ou une opération (rééducation).

*Mots-clés : Apprentissage, performance, rééducation, robotique, biomécanique, sport*

### Contexte

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans les 3 thèmes de l'équipe RoBioSS « Dynamique du mouvement », « Interactions physiques et systémiques » et Assistance mécatronique et cobotique ».

L'apprentissage d'habiletés motrices, relevant tout autant de mouvements de la vie quotidienne que de gestes techniques amenant à la performance sportive de haut-niveau, repose principalement sur deux processus : l'apprentissage de la trajectoire et celui des adaptations dynamiques [16].

Par la suite, nous entendrons par « mouvement global », le mouvement de l'ensemble du corps pour réaliser un geste donné (Figure 1a) et « mouvement isolé » (décontextualisé), le mouvement d'une articulation donnée, identique (d'un point de vue cinématique) à celui réalisé pendant le mouvement global, mais réalisé sans solliciter les autres articulations du corps (Figure 1b).

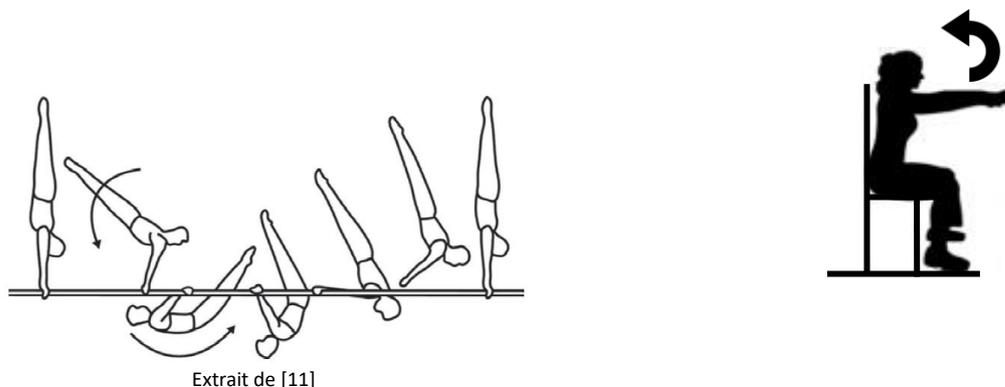


Figure 1 : Différence entre une antépulsion réalisée lors d'un « mouvement global » (a) et lors d'un « mouvement isolé » (b).

Si l'apprentissage de la cinématique articulaire peut être initié en mimant, de manière isolée, la gestuelle à réaliser, cette approche montre rapidement ses limites, dès lors que l'on s'intéresse à l'aspect dynamique du mouvement. En effet, réaliser par exemple une adduction du bras droit en position debout pour ensuite la réaliser lors d'un salto arrière en vue de réaliser une vrille, ne nécessite pas de générer le même couple articulaire au niveau de l'épaule, alors que la cinématique articulaire est strictement identique [13]. De même, reproduire les mouvements de flexions-extensions au niveau des genoux observés pendant la marche avec les pieds dans le vide (comme assis sur une table de rééducation), ne requiert pas les mêmes niveaux d'efforts articulaires que ceux à produire lorsqu'il faut en plus de se déplacer, supporter son poids.

L'utilisation de systèmes robotiques pour aider à l'apprentissage de la trajectoire (guidage) n'a pas montré de réels bénéfices directs [8,14]. En revanche, le guidage par robot peut s'avérer utile lorsque le mouvement implique plusieurs articulations et/ou plusieurs tâches, car il permet de libérer l'attention de certains aspects du mouvement pour se concentrer sur d'autres [9].

Concernant les adaptations dynamiques, des recherches récentes [5,17] ont montré que le processus d'adaptation dynamique s'appuyait sur les erreurs observées lors du mouvement précédent. En appliquant une force, via un dispositif robotique, proportionnelle à l'écart observé par rapport à la trajectoire souhaitée, il est alors possible de corriger la trajectoire (« Error-based learning »). Une modélisation mathématique de ce principe a été proposée par [4] et expérimentée avec des sujets marchant sur tapis roulant. Cependant, la question du compromis entre le niveau d'apprentissage et la quantité d'assistance à fournir reste à étudier.

Les entraîneurs-techniciens du sport appliquent depuis longtemps ce principe et font preuve d'imagination pour élaborer des dispositifs simples. Par exemple, suspendre un seau au bout d'une corde et demander au gymnaste, apprenant à faire des cercles aux arçons, de placer ses pieds dans le seau (Figure 2), permet au gymnaste de créer l'effort extérieur nécessaire pour maintenir ses pieds au-dessus du sol.

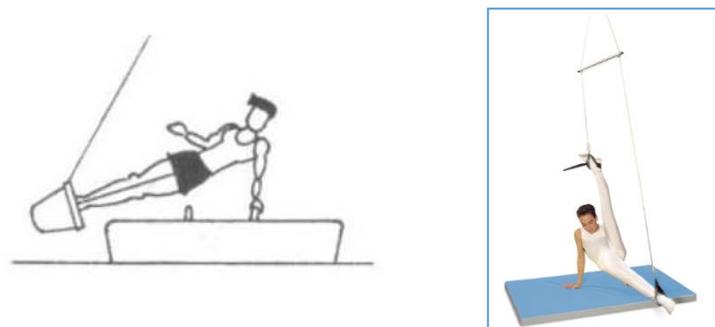


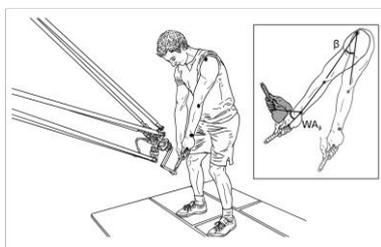
Figure 2 : Dispositif d'apprentissage de la cinématique du cercle aux arçons.

Si ce dispositif s'avère efficace en début de phase d'apprentissage en permettant de faciliter la découverte de la gestuelle, son usage prolongé devient rapidement contre-productif, car il favorise la mise en place d'efforts articulaires très différents de ceux que le gymnaste aura à fournir. En effet, que se passe-t-il, quand on retire le seau et donc la possibilité de créer un effort extérieur au niveau des pieds ? L'utilisation de ce type de dispositif questionne donc les capacités de transfert d'apprentissage.

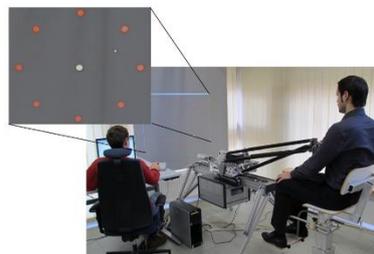
La même analyse peut être faite pour toutes sortes d'aide/assistance apportées par un entraîneur, un dispositif robotisé (comme un exosquelette [10]) ou encore un kinésithérapeute lors de la réalisation d'un geste. Il s'agit plus, en réalité, de dispositifs d'assistance que d'apprentissage, dans le sens où ils vont pallier un déficit en termes d'efforts.

Une autre stratégie d'assistance robotique, appelée « error-augmentation strategy » a alors été étudiée par [15]. Elle consiste à faire appliquer, par un dispositif robotique, une force opposée à celle qu'il faudrait appliquer pour corriger les éventuels écarts de trajectoire. Si cette stratégie entraîne des écarts de trajectoire plus importants dans un premier temps, lorsque l'effort exercé disparaît, on observe un « after-effect » qui amène le sujet à suivre parfaitement la trajectoire souhaitée, tout en effectuant des activations musculaires adéquates.

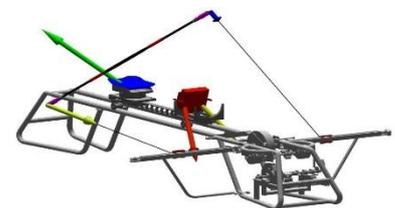
La plupart des dispositifs mécanique/mécatronique existants, en lien avec le mouvement, ont été mis au point afin de mener des études dans le domaine du contrôle moteur (Figure 3a et 3b), de l'analyse et de la simulation de mouvement (Figure 3c et 3d) ou pour proposer des programmes de rééducation (Figure 3e). Rares sont ceux destinés à l'apprentissage de gestes et au renforcement musculaire spécifique. La conception des ergomètres actuels nécessitent, de la part de l'utilisateur/sportif, une maîtrise de la gestuelle pour que les efforts ressentis soient perçus comme réalistes. **Il n'existe pas d'ergomètres asservis par un modèle biomécanique de simulation du mouvement, tenant compte des caractéristiques anthropométriques du sujet, qui permettent d'apprendre à développer les efforts articulaires nécessaires tout en ayant un retour sur la qualité de la cinématique réalisée.** La problématique scientifique générale proposée par ce programme de recherche s'inscrit, à terme, dans le développement de ce type d'ergomètre, dont l'utilisation peut s'étendre du domaine de la rééducation fonctionnelle à celui de la performance sportive de haut niveau.



a) Contrôle du poignet lors du putt au golf.



b) BioMotionBot pour l'analyse de tâches sensori-motrices



c) Ergomètre Kayak instrumenté pour la simulation de gestes sportifs (RoBioSS)



d) Ergocycle instrumenté pour l'analyse du mouvement de pédalage (RoBioSS)



e) Dispositif iso-cinétique destiné à la rééducation  
Extrait de <https://www.medimex.fr/humac-norm-by-csmi.html>

Figure 3 : Exemples de dispositifs mécaniques et mécatroniques en lien avec le mouvement humain (a extrait de [12]; b extrait de[1]).

## Objectifs

Les objectifs de ce projet sont de développer un dispositif mécatronique permettant à la fois :

- D'apprendre à réaliser une cinématique articulaire cible lors d'un mouvement isolé TOUT EN
- Apprenant à produire, lors d'un mouvement isolé, les efforts articulaires développés pour cette cinématique lors du mouvement global. Ces efforts seront obtenus par optimisation du geste en fonction des caractéristiques anthropométriques et des capacités physiques du sujet.
- De définir la force opposée idéale à appliquer pour qu'elle soit acceptable par l'utilisateur.
- De tenir compte du niveau d'apprentissage, d'expertise dans l'assistance robotique
- De définir les différentes formes de feedback qui permettent d'optimiser les apprentissages sans rendre les apprenants dépendants.

Etapes	Tâches	Biomécanique	Psychologie cognitive	Robotique
<b>Développement d'un modèle de simulation / optimisation du mouvement</b>	Capture de mouvement de référence	X		
	Modélisation et optimisation du mouvement	X		X
<b>Conception d'un dispositif mécatronique</b>	Dimensionnement des actionneurs			X
	Définition des modes d'interaction homme / machine		X	X
<b>Evaluation du dispositif</b>	Mise au point et réalisation de protocoles d'apprentissage	X	X	X
	Mise au point et réalisation de protocoles d'évaluation de l'apprentissage (rétention)	X	X	X

		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Etat de l'art	Revue de littérature												
	Développement d'un modèle de simulation / optimisation du mouvement												
Conception d'un dispositif mécatronique	Capture de mouvement de référence												
	Modélisation et optimisation du mouvement												
	Dimensionnement par simulation des actionneurs												
Evaluation du dispositif	Définition des modes d'interaction homme / machine												
	Dessins / Usinage / Montage des pièces												
	Mise au point des protocoles d'apprentissage												
Communication	Réalisation de protocoles d'apprentissage												
	Mise au point des protocoles d'évaluation de l'apprentissage (rétention)												
	Réalisation des protocoles d'évaluation de l'apprentissage (rétention)												
	Rédaction d'articles												
Communication	Rédaction de la thèse												

Diagramme de Gantt prévisionnel

Après avoir choisi un mouvement cible, il s'agira de procéder à son analyse biomécanique afin d'identifier l'articulation prépondérante dans la réussite du geste et d'en extraire à la fois la cinématique et la dynamique articulaires. Un algorithme d'optimisation du mouvement s'appuyant sur les travaux déjà menés au sein de RoBioSS [6,19] sera configuré de façon à générer la cinématique et la dynamique articulaires optimales en fonction de l'anthropométrie du sujet et de ses capacités physiques. Ces données serviront de base à la conception du dispositif d'apprentissage ainsi qu'au dimensionnement de ses actionneurs.

Il conviendra ensuite de définir les différents modes d'interaction du sujet avec le dispositif, que ce soit lors des phases d'apprentissage du geste que lors de tests de rétention et de transfert en condition réelle du geste. Pour cela, on s'appuiera sur les compétences en contrôle-commande multiaxes développée au sein de RoBioSS (notamment en robotique ouverte en interaction avec l'humain [20]). L'assistance robotique sera définie en fonction des capacités de l'Homme à planifier et contrôler son mouvement dans un champ de force modifié [18], afin de garantir une exécution rapide et fluide. Les informations visuelles à fournir au sujet en temps réel ou à l'issue de l'essai (nature, fréquence, mode de présentation des feedbacks) devront également être étudiées de façon systématique.

Enfin, la mise en œuvre du dispositif s'effectuera en deux temps : une première phase dite « d'apprentissage » où les sujets répèteront le geste avec l'aide de feedbacks qu'il conviendra de définir et de mettre au point collégialement et une phase de « rétention » où il sera demandé au sujet de reproduire le geste appris sans l'aide de feedbacks extérieurs (il ne pourra s'appuyer que sur des informations visuelles et ou proprioceptives). L'évaluation finale du dispositif consistera à

tester son apport lors de l'apprentissage d'un geste par comparaison du mouvement global produit par un groupe ayant eu recours au dispositif et un groupe s'entraînant de manière conventionnelle.

Nous envisageons de tester le dispositif en le mettant en œuvre lors de l'apprentissage, par des gymnastes, d'un élément réalisé aux barres parallèles appelé le « basket to handstand » que l'on peut traduire par « salto en dessous des barres jusqu'à l'appui tendu renversé » (Figure 3a). Cet élément est intéressant car il s'agit d'un élément de base à cet agrès qui permet d'évoluer vers d'autres éléments plus difficiles et valorisés (Figure 4).

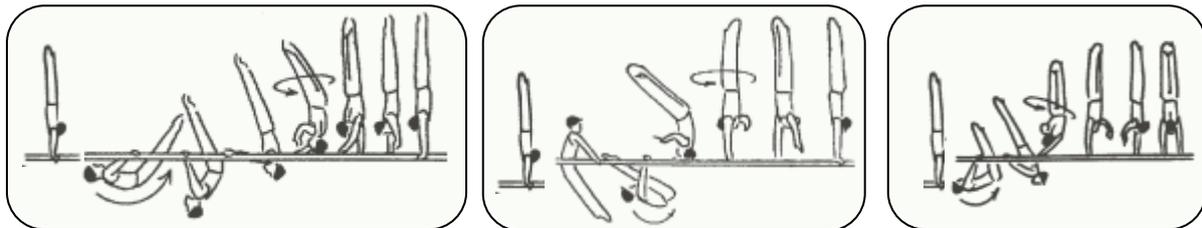


Figure 4 : Evolutions de l'élément de base

Dans sa version de base, « basket to handstand » peut être considéré comme un mouvement plan et donc analysé en 2D et sollicite majoritairement les articulations de l'épaule tel qu'illustré à la figure 3a (forme technique privilégiée en début d'apprentissage de ce geste [11]). De plus, ce mouvement présente l'avantage de comporter des phases à la fois de contraction concentrique, d'extension et de contraction isométrique avec des puissances articulaires positives et négatives, ce qui permettra d'éprouver le dispositif dans toute la gamme de mouvements articulaires possibles.

### Moyens expérimentaux

Le(la) candidat(e) aura à sa disposition les outils de capture du mouvement de la plateforme HuMANs référencée à l'université de Poitiers (<https://www.pprime.fr/?q=fr/humans>) et les dispositifs mécatroniques de la plateforme DextRobUP du réseau Robotex (<https://seafire.unistra.fr/f/da512f8bb1/>). Elles se composent de plusieurs systèmes de Mocap (Vicon – Qualisys), des plateformes de forces 3D et d'autres capteurs classiquement utilisées en analyse du mouvement (capteurs de couple, électromyographie, centrales inertielles ...) et de robots collaboratifs pilotés à l'aide d'un framework de robotique ouverte développé au sein de l'équipe RoBioSS.

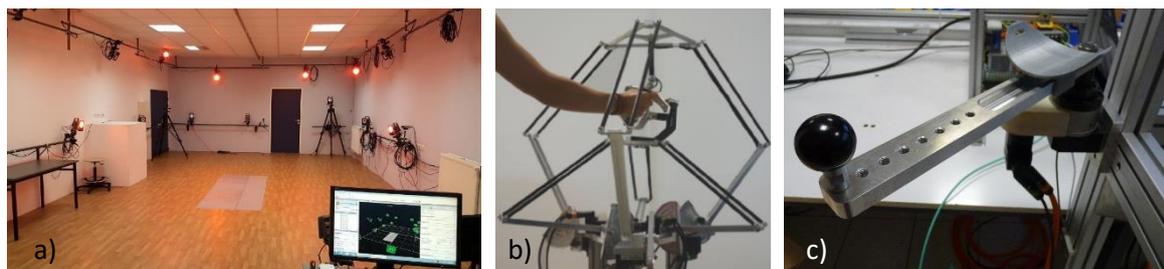


Figure 5 : Plateforme HuMANs (a), Plateforme DextRobUP [20](b), Prototype (c)

Il(elle) pourra également s'appuyer sur les outils de conception mécanique de l'institut P' (Solidworks, atelier de mécanique) et d'automatisation (B&R Automation), ainsi que sur un premier prototype monoaxe comme banc d'essai qui a permis de valider la faisabilité de l'approche envisagée.

### Bibliographie associée

- <sup>1</sup> *Bartenbach V, Sander C, Pöschl M, Wilging K, Nelius T, Doll F, Burger W, Stockinger C, Focke A, Stein T.* The BioMotionBot: A robotic device for applications in human motor learning and rehabilitation. *J Neurosci Methods* 2013; 213: 282–297
- <sup>2</sup> *Blandin Y, Toussaint L, Shea CH.* Specificity of Practice: Interaction between concurrent sensory information and terminal feedback. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition* 2008; 34: 994–1000
- <sup>3</sup> *Boutin L, Eon A, Zegloul S, Lacouture P.* From human motion capture to humanoid locomotion imitation Application to the robots HRP-2 and HOAP-3. *Robotica* 2011; 29: 325–334
- <sup>4</sup> *Emken JL, Benitez R, Reinkensmeyer DJ.* Human-robot cooperative movement training: Learning a novel sensory motor transformation during walking with robotic assistance-as-needed. *J NeuroEngineering Rehabil* 2007; 4: 8
- <sup>5</sup> *Emken JL, Benitez R, Sideris A, Bobrow JE, Reinkensmeyer DJ.* Motor Adaptation as a Greedy Optimization of Error and Effort. *J Neurophysiol* 2007; 97: 3997–4006
- <sup>6</sup> *Eon A.* Contribution à la génération de mouvements dynamiques pour les robots humanoïdes et au dimensionnement de leurs actionneurs. Université de Poitiers 2009;
- <sup>7</sup> *Fohanno V, Begon M, Lacouture P, Colloud F.* Estimating joint kinematics of a whole body chain model with closed-loop constraints. *Multibody Syst Dyn* 2014; 31: 433–449
- <sup>8</sup> *Gillespie RB, O'Modhrain M, Tang P, Zaretzky D, Pham C.* The virtual teacher. *Proc ASME Dyn Syst Control Div* 1998; 64: 171–178
- <sup>9</sup> *Griffiths PG, Gillespie RB.* Sharing Control Between Humans and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. *Hum Factors J Hum Factors Ergon Soc* 2005; 47: 574–590
- <sup>10</sup> *Hayes S, White M, White H, Vanicek N.* Biomechanical profiles of able-bodied robotic exoskeleton gait and normal walking. *Gait & Posture* 2018; 65: 33–35
- <sup>11</sup> *Hiley MJ, Yeadon MR.* The effect of cost function on optimum technique of the undersomersault on parallel bars. *J Appl Biomech* 2012; 28: 10–19
- <sup>12</sup> *Kümmel J, Kramer A, Gruber M.* Robotic guidance induces long-lasting changes in the movement pattern of a novel sport-specific motor task. *Hum Mov Sci* 2014; 38: 23–33
- <sup>13</sup> *Monnet T., Decatoire A., Lacouture P.* Comparison of shoulder's net moment between practice and real condition. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 2005; 8: 197–198

- <sup>14</sup> *O'Malley M, Gupta A, Gen M, Li Y.* Shared control in haptic systems for performance enhancement and training. *J Dyn Syst Meas Control Trans ASME* 2006; 128: 75–85
- <sup>15</sup> *Patton JL, Mussa-Ivaldi FA.* Robot-assisted adaptive training: custom force fields for teaching movement patterns. *Biomed Eng IEEE Trans On* 2004; 51: 636–646
- <sup>16</sup> *Reinkensmeyer DJ, Patton JL.* Can Robots Help the Learning of Skilled Actions? *Exerc Sport Sci Rev* 2009; 37: 43–51
- <sup>17</sup> *Scheidt RA, Dingwell JB, Mussa-Ivaldi FA.* Learning to Move Amid Uncertainty. *J Neurophysiol* 2001; 86: 971–985
- <sup>18</sup> *Scotto Di Cesare C, Bringoux L, Bourdin C, Sarlegna FR, Mestre DR.* Spatial localization investigated by continuous pointing during visual and gravito-inertial changes. *Experimental Brain Research* 215: 173–182
- <sup>19</sup> *Seguin P, Bessonnet G, Sardain P.* A Parametric Optimization Approach to Walking Pattern Synthesis. *The International Journal of Robotics Research* 2005; 24: 523–536
- <sup>20</sup> *Vulliez M, Zegloul S, Oussama K.* Design strategy and issues of the Delthaptic, a new 6-DOF parallel haptic device. *Mechanism and Machine Theory* 2018; 128: 395–411
- <sup>21</sup> *Vulliez P, Gazeau JP, Laguillaumie P, Mnyusiwalla H.* Focus on the mechatronics design of a new dexterous robotic hand for inside hand manipulation. *Robotica* 2018; 36: 1206–1224