

L'APPRENTISSAGE DES COORDINATIONS MOTRICES COMPLEXES : UNE COOPERATION ENTRE COORDINATION SPONTANEE ET COORDINATION EXPERTE

Didier Delignières et Caroline Teulier
EA 2991, Université Montpellier I

Résumé

Nous présentons dans ce texte les principaux résultats d'un programme de recherche mené depuis une dizaine d'années sur l'acquisition des habiletés complexes. Nos résultats montrent pour l'essentiel que les débutants tendent généralement à adopter dans une tâche nouvelle des comportements assez similaires, qui peuvent être interprétés sur la base des principes généraux de synchronisation mis en évidence par la théorie des systèmes dynamiques. En fonction de la nature de la tâche, cette « canalisation » initiale du comportement peut cependant être plus ou moins prégnante. L'adoption du comportement expert est réalisée au terme d'une phase de transition au cours de laquelle comportement initial et comportement expert sont exploités en alternance. Ces résultats suggèrent une vision nouvelle du processus d'apprentissage, supposant une sorte de « coopération » entre le pattern spontanément utilisé par les débutants et le pattern expert.

Les coordinations motrices complexes

Les travaux que nous allons présenter portent sur l'acquisition des coordinations motrices complexes. Cela signifie tout d'abord que les tâches auxquelles nous nous sommes intéressés posaient avant tout aux participants des problèmes de coordination entre les multiples degrés de liberté du système. Dans ce sens, nous nous situons à l'opposé des nombreux travaux sur l'apprentissage qui ont antérieurement porté sur des tâches unisegmentaires, par exemple sur des tâches de positionnement linéaire, sur la base de la seule variable dépendante de l'écart à la cible.

Par ailleurs, si nous nous situons dans le courant de recherche initié par Zanone et Kelso (1992) sur l'apprentissage des coordinations plurisegmentaires, nous nous sommes principalement intéressés à l'acquisition de coordinations motrices globales (*gross motor skills*), proches de la motricité sportive. Il s'agissait pour nous de voir si les principes dégagés par ces auteurs dans le cadre des coordinations bi-manuelles pouvaient éclairer la question de l'acquisition de coordinations plus complexes, mobilisant l'ensemble du corps. Wulf et Shea (2002) ont montré que cette question du passage des habiletés simples aux habiletés complexes était loin d'être triviale.

Nous avons donc été amenés à réaliser un certain nombre de travaux, sur un ensemble de tâches de laboratoire, dont certaines comme le simulateur de ski ont été abondamment exploitées par d'autres équipes de recherche, et certaines, plus inédites, ont été construites dans le but de tester certaines hypothèses spécifiques.

Nous nous sommes posés dans ce programme de recherche un certain nombre de questions, que l'on peut résumer ainsi :

1. Peut-on identifier des principes généraux régissant l'adoption, par les débutants, de leurs comportements initiaux dans la tâche ?
2. Ces comportements initiaux sont-ils communs à tous les débutants, ou diffèrent-ils d'un individu à l'autre ?
3. En quoi ces comportements initiaux diffèrent-ils des comportements experts, adoptés plus tardivement dans la pratique ?
4. Les comportements initiaux sont-ils susceptibles de résister longtemps à l'apprentissage ?
5. Comment s'effectue la transition du comportement initial au comportement expert ? S'agit-il d'une transition brutale, ou d'un passage plus progressif ?
6. Enfin quelles relations entretiennent le comportement initial et le comportement expert, dans la dynamique de l'apprentissage ?

Les coordinations spontanées

Une première étude a porté sur l'analyse de l'apprentissage des balancers en suspension mi-renversée aux barres parallèles (Figure 1 ; Delignières, Nourrit, Sioud, Leroyer, Zattara & Micaléff, 1998). Cette recherche a mis en évidence que dans ce type de tâche tous les débutants adoptaient un comportement similaire. Ce comportement était caractérisé par une synchronisation stricte des principaux oscillateurs du système : plus précisément, nous avons analysé la coordination entre les oscillations pendulaires du centre de gravité par rapport aux mains, et les oscillations verticales du centre de gravité au-dessus de la ligne d'épaule. Chez les débutants, ces deux oscillateurs adoptent la même fréquence (coordination 1 :1), et leur points de revirement sont rigoureusement synchronisés (coordination en phase).

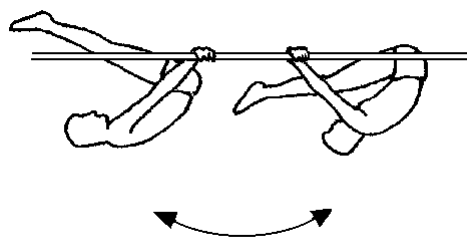


Figure 1 : les oscillations en suspension mi-renversées aux barres parallèles

Il est à noter que dans cette tâche, les experts adoptent une coordination beaucoup plus complexe, caractérisée par un rapport de fréquence 2 :1, et un décalage de phase de 90° entre les deux oscillateurs. Ce mode de coordination permet une exploitation optimale des forces externes, et notamment du travail moteur de la pesanteur. Il s'agit cependant d'une coordination assez délicate à contrôler, supposant notamment une fréquence élevée des mouvements de flexion/extension du corps, et l'on peut faire l'hypothèse que l'adoption d'un mode de coordination plus simple, chez les débutants, renvoie avant tout à un souci de facilité de contrôle.

Lors d'une expérimentation sur le simulateur de ski (Figure 2 ; Nourrit, Delignières, Caillou, Deschamps & Lauriot, 2003), nous avons à nouveau mis en évidence que tous les débutants adoptaient un comportement similaire, caractérisé par l'exploitation d'une fonction d'amortissement de type « Rayleigh ». Ce comportement est principalement révélé par un forçage précoce du dispositif dans le cycle d'oscillation. Nous avons pu également noter dans ces deux expérimentations que si le comportement des débutants était qualitativement identique, il présentait cependant une grande variabilité autour du pattern commun.

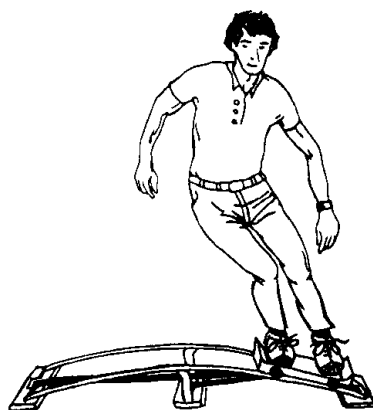


Figure 2 : Le simulateur de ski

Néanmoins, lors d'un travail récent utilisant une balançoire expérimentale (Figure 3 ; Teulier & Delignières, 2004), nous avons à l'inverse obtenu une grande variabilité qualitative du comportement des débutants, tant au niveau inter-individuel qu'au niveau intra-individuel. En d'autres termes, dans cette tâche, la coordination entre les mouvements de la balançoire et les mouvements de flexion/extension du corps pouvait prendre des formes variables d'un individu à l'autre (en termes de rapport de fréquence ou de décalage de phase), mais également chez un même individu lors des cycles successifs composant un même essai.

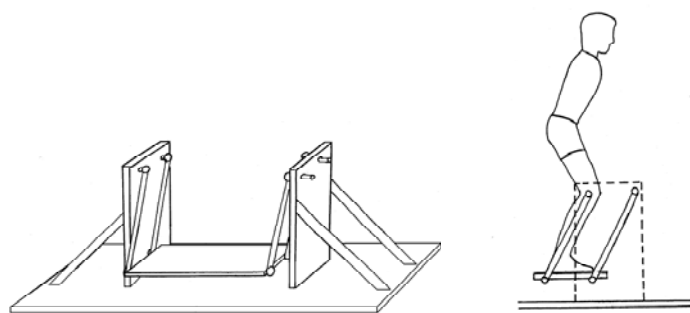


Figure 3 : La balançoire expérimentale. Dans cette expérience, le sujet effectuait des oscillations antéro-postérieures.

L'idée d'une forte convergence des comportements adoptés par les débutants semble donc devoir être relativisée en fonction de la nature de la tâche. Il semble que dans certains cas, les contraintes constitutives du système canalisent fortement l'émergence des coordinations vers une solution obligée. Dans d'autres cas, le système semble moins contraignant, et autorise

l'adoption de modes de coordination plus diversifiés. Les sujets semblent alors devoir explorer l'espace de la tâche à la recherche des solutions pertinentes (Newell, Kugler, van Emmerik & McDonald, 1989).

La résistance au changement de la dynamique intrinsèque

Un second résultat important de nos travaux sur les barres parallèles et le simulateur de ski est la grande résistance au changement des coordinations des débutants. Lors de l'expérimentation sur les barres parallèles, aucun participant n'avait significativement modifié son mode de coordination, malgré 8 sessions de pratique de 10 essais chacune (Delignières et al., 1998). Sur le simulateur de ski, nous avons observé une modification du comportement et un abandon des coordinations initiales, mais ce processus n'a été initié qu'au bout de 50 essais de une minute pour les sujets les plus précoces, et il a fallu attendre 150 essais chez le sujet le plus lent (Nourrit et al., 2003). On doit noter cependant que cette expérimentation a utilisé une version particulièrement délicate de simulateur (le dispositif initial ayant été converti en mono-ski).

Il ne faut cependant pas conclure de ces résultats qu'il ne se passe rien dans cette première phase de l'apprentissage : on observe en fait une amélioration très rapide de variables de performance telles que l'amplitude des oscillations. Il semble en fait que les débutants parviennent à exploiter efficacement leurs modes spontanés de coordination pour satisfaire aux exigences de la tâche. Cette exploitation première, si elle se révèle efficace reste cependant peu efficiente sur le plan énergétique. Cette observation est cependant importante, car elle invite à ne pas confondre l'amélioration des performances, qui peut correspondre à une simple adaptation aux contraintes de la tâche, et l'apprentissage, qui renvoie à l'adoption de modes de coordination nouveaux.

Enfin l'inertie des coordinations initiales paraît dépendante de la tâche étudiée, et notamment de sa difficulté. Lors d'un second travail sur le simulateur de ski, utilisant la version traditionnelle, plus facile, de la tâche, Delignières, Teulier et Nourrit (2005) ont montré que l'abandon du comportement initial pouvait apparaître dès la première semaine de pratique.

Le comportement expert

Comme nous l'avons précédemment évoqué, le comportement expert est généralement caractérisé par une exploitation optimale des forces réactives du système (Bernstein, 1967). Sur les barres parallèles, les experts forcent le système au passage en verticale basse, au balancer avant puis au balancer arrière, de manière à accompagner l'action de la pesanteur (Delignières et al., 1998). Sur le simulateur de ski, nous avons montré que les sujets convergeaient au cours de la pratique vers l'adoption d'un comportement d'amortissement de type « van der Pol ». Ce type d'amortissement révèle une gestion plus efficace de la force de rappel des bandes élastiques du simulateur (Nourrit et al., 2003). D'une manière générale, le comportement expert se révèle extrêmement stable au niveau intra-individuel (Nourrit, Caillou, Deschamps, Lauriot & Delignières, 1999), et extrêmement consistant au niveau inter-individuel (Delignières et al., 1998 ; Nourrit et al., 2003).

Transition vers le comportement expert

La transition du comportement initial au comportement expert est délicate à observer. Souvent les auteurs se contentent de constater a posteriori que l'apprentissage a eu lieu, mais ne disposent que de peu d'éléments pour en attester la nature (Newell, 1991). Lors de l'expérimentation sur le simulateur de ski, nous avons pu montrer que cette transition n'était pas brutale : elle semblait au contraire représenter un processus progressif, qui pouvait pour certains sujets se dérouler sur une centaine d'essais successifs (Nourrit et al., 2003). Une analyse approfondie du comportement des sujets a cependant révélé que cette phase de transition n'était pas caractérisée par l'adoption de modes de coordination intermédiaires entre les modes initial et expert. On découvre plutôt au cours de cette phase une exploitation alternée, souvent au sein du même essai, d'un cycle à l'autre, des modes de coordination débutant et expert (Figure 4). Nous avons proposé de formaliser cette transition en tant que bifurcation de type nœud-col (*saddle-node*), représentant le passage d'un premier régime mono-stable à un second régime mono-stable, et caractérisée par un régime intermédiaire bi-stable, présentant deux zones attractives. La phase d'alternance que nous avons observée pourrait correspondre à une station prolongée dans ce régime bi-stable.

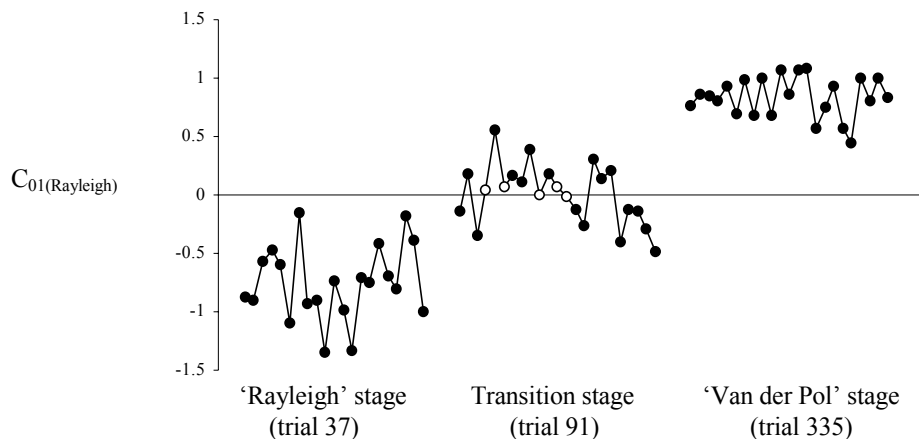


Figure 4 : Analyse cycle à cycle du comportement d'amortissement, lors de 3 essais caractéristiques sur le simulateur de ski. L'indice mesuré ($C_{01Rayleigh}$) signe par des valeurs négatives un amortissement de type Rayleigh, et par des valeurs positives un amortissement de type van der Pol (pour plus de détails, voir Nourrit et al., 2003). Le premier échantillon (essai 37) renvoie à la phase initiale de l'apprentissage : le participant exploite de manière consistante un amortissement de type Rayleigh. Le dernier échantillon (essai 335) est caractéristique de la dernière phase, au cours de laquelle le sujet exploite de manière consistante et stable un amortissement de type van der Pol. L'échantillon médian (essai 91) est typique de la phase de transition : le sujet alterne, souvent d'un cycle à l'autre, entre les deux types d'amortissement.

Nous avons récemment confirmé ce résultat dans une expérimentation utilisant la balançoire expérimentale dont nous avons précédemment parlé. Dans ce travail les sujets réalisaient des oscillations latérales sur la balançoire (Figure 5). Au terme de dix sessions de pratique, les sujets avaient tous adopté un mode de coordination expert, caractérisé par un forçage exercé aux deux points de revirement gauche et droit de la balançoire. Ce mode de coordination correspond en effet à une exploitation optimale et symétrique du système (Teulier & Delignières, 2004). L'adoption de ce comportement expert était précédée par une phase

durant laquelle les sujets exploitaient alternativement ce mode de coordination en 2 :1 avec un mode de coordination plus simple, où un seul forçage était réalisé, soit au point de revirement droit, soit au point de revirement gauche.

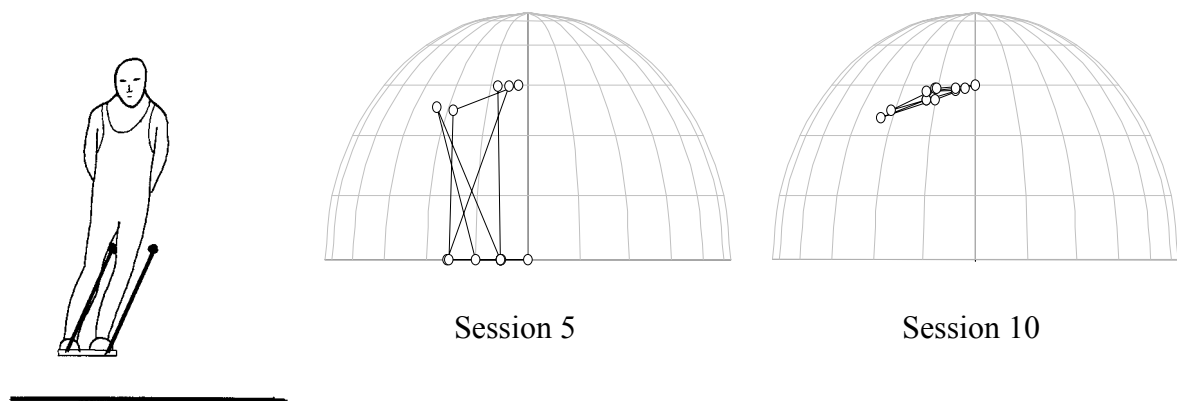


Figure 5 : Dans cette expérience, le sujet réalisait sur la balançoire (voir figure 2) des oscillations latérales. Les deux demi-sphères rendent compte des coordinations produites lors de deux essais, l'un en 5^{ème} session, et l'autre en 10^{ème} session. Les points situés à l'équateur signent un forçage unique au voisinage du point de revirement gauche. Un forçage unique au voisinage du point de revirement droit serait révélé par des points situés au pôle. Les points situés dans la zone tempérée révèlent quant à eux l'adoption d'une coordination en 2 :1, avec un forçage sur chaque point de revirement. La Session 5 est typique d'une alternance entre deux types de coordination, la coordination initiale (1 :1) et la coordination experte (2 :1)

Il semble en fait que durant cette phase de transition, les sujets utilisent le comportement initial comme une sorte de « tête de pont », permettant l'exploration de nouveaux comportements, mais aussi offrant à tout instant une solution de repli. Cette alternance permet en quelque sorte une exploration sécurisée du comportement expert, le sujet pouvant à tout moment revenir au comportement initial qu'il maîtrise de manière satisfaisante.

Par ailleurs, la phase initiale de l'apprentissage, au cours de laquelle le comportement initial est exploité de manière exclusive, est marquée par une certaine évolution paramétrique de ce comportement, qui semble destinée à en permettre l'utilisation en alternance avec le comportement expert. Nous avons par exemple observé, lors de l'expérimentation sur les barres parallèles, que l'un des sujets tendait en fin d'expérience, tout en continuant à exploiter une coordination en 1 :1, à décaler progressivement le forçage du point de revirement arrière (phase 0) au passage en verticale basse (phase 90°). Cette évolution du comportement initial aurait pu déboucher sur une exploitation alternée des coordinations 1 :1 et 2 :1, préparant l'adoption définitive de la coordination experte (Delignières et al., 1998). Un travail en cours tente de tester cette hypothèse.

De même, lors de l'expérimentation sur le simulateur de ski, nous avons observé que l'initiation de la phase de transition était systématiquement marquée par un accroissement de la fréquence des oscillations, de 1.0 Hz à 1.4 Hz (Figure 6). La théorie suppose en effet que des oscillations de grande amplitude et de haute fréquence favorisent l'apparition de l'amortissement de van der Pol. On peut dire ici que tout en continuant à exploiter son premier comportement, le sujet prépare l'émergence du second.

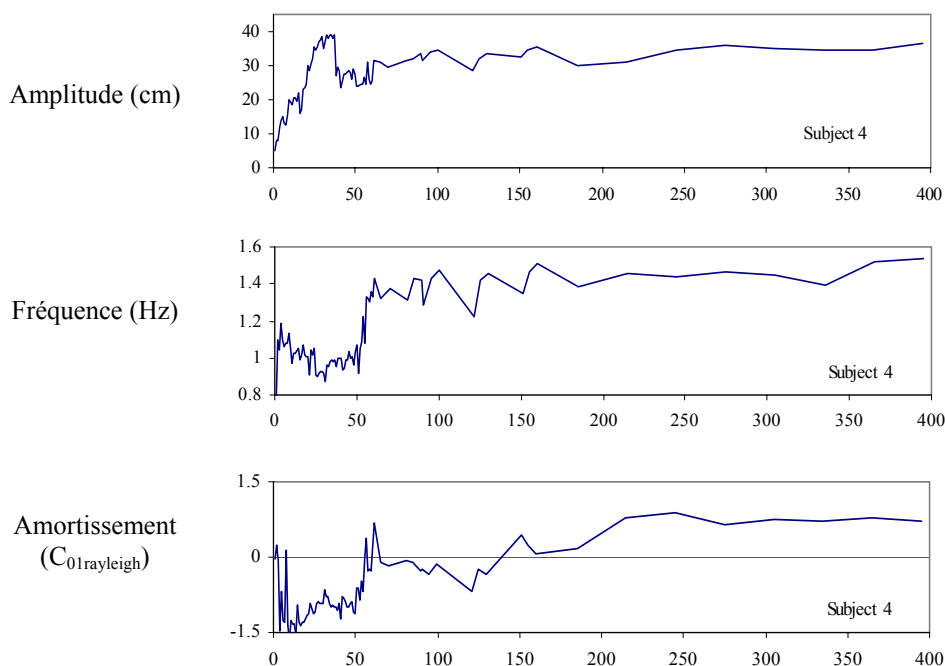


Figure 6 : Cette figure représente l'évolution de l'amplitude (en cm, en haut), de la fréquence (en Hz, au milieu) et du comportement d'amortissement (coefficient $C_{01Rayleigh}$, voir figure 4, en bas), lors des 390 essais de l'expérimentation sur le simulateur de ski, pour un sujet représentatif (Nourrit et al., 2003). L'amplitude atteint son niveau maximum au bout d'une trentaine d'essais. Il faut attendre le cinquantième essai pour que le sujet entre dans la phase de transition qui l'amènera à adopter définitivement le comportement expert, vers le 200^{ème} essai (graphique du bas). On peut noter un accroissement brutal de la fréquence, vers l'essai 50, contemporain à l'entrée dans la phase de transition.

De manière assez paradoxale, on peut dire qu'il existe une sorte de *coopération* entre la coordination initiale et la coordination experte, la première préparant en quelque sorte l'émergence de la seconde, qui finira par la supplanter. Cette vision de l'apprentissage contraste avec nombre de propositions antérieures, qui considéraient plutôt l'émergence des coordinations nouvelles comme devant s'imposer contre les tendances spontanées du système (Walter & Swinnen, 1994 ; Zanone & Kelso, 1992).

Conclusion

Ces travaux sur l'apprentissage ont porté sur des tâches diverses, qui ont été systématiquement construites pour tester certaines hypothèses spécifiques. Dans ce sens, ils peuvent se révéler insatisfaisants pour certains lecteurs recherchant des résultats relatifs à telle ou telle activité sportive. Notre approche est sous-tendue par l'approche synergétique des coordinations initiée par Scott Kelso (Kelso, 1995), que nous pensons pertinente pour appréhender l'analyse de toute activité de coordination. Nous avons notamment collaboré sur une approche des coordinations en natation qui a semblé confirmer le caractère heuristique de ce cadre théorique (Delignières & Chollet, 1999 ; Seifert, Delignières, Boulesteix & Chollet, 2005).

Nous avons cependant montré que le comportement du débutant et son évolution au cours de la pratique étaient fortement dépendants de la nature de la tâche. Une mise à l'épreuve de nos hypothèses, dans des tâches présentant des systèmes différents de contraintes, reste nécessaire pour attester de leur pertinence et déboucher sur une théorie plus complète de l'acquisition des habiletés motrices complexes.

Références

Bernstein, N.A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.

Delignières D., & Chollet D. (1999). Quelques idées neuves sur les coordinations en natation. In P. Pelayo & M. Sidney (Eds.), *Actes des 2^{ème} journées spécialisées de natation* (pp. 15-26). Liévin, France : Université de Lille.

Delignières, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M. & Micaleff, J.P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17, 221-241.

Delignières, D., Teulier, C. & Nourrit D. (2005). *The evolution of oscillatory behavior during learning on a ski-simulator*. Manuscript submitted for publication.

Kelso, J.A.S (1995). *Dynamics patterns: the self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA : MIT Press.

Newell, K.M. (1991). Motor Skill Acquisition. *Annual Review of Psychology*, 42, 213-237.

Newell, K.M., Kugler, P.N., van Emmerik, REA & McDonald, P.V. (1989). Search strategies and the acquisition of coordinations. In S.A. Wallace (Ed.), *Perspectives on the coordination of movement* (pp. 85-122). North-Holland: Elsevier.

Nourrit, D., Caillou, N., Deschamps, T., Lauriot, B. & Delignières, D. (1999). *Expertise et invariance spatio-temporelle : une comparaison experts-novices en bowling*. Communication présentée au VIII^o Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, Macolin, 31 Octobre-3 Novembre 1999.

Nourrit, D., Delignières, D., Caillou, N., Deschamps, T., & Lauriot, B. (2003) On discontinuities in motor learning: A longitudinal study of complex skill acquisition on a ski-simulator. *Journal of Motor Behavior*, 35, 151-170.

Seifert, L., Delignières, D., Boulesteix, L. & Chollet, D. (2005). *Effect of expertise on butterfly stroke coordination*. Manuscript submitted for publication.

Teulier, C. & Delignières, D. (2004). *Inter-individual similarities and differences in learning to pump a swing*. Manuscript submitted for publication.

Walter, C.B. & Swinnen, S.P. (1994). The formation of "bad habits" during the acquisition of coordination skills. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion and P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical and cognitive constraints* (pp. 491-513). New York: Academic Press.

Wulf, G. & Shea, C.H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 185-211.

Zanone, P.G. & Kelso, J.A.S. (1992). Evolution of Behavioral Attractors with Learning: Nonequilibrium Phase Transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 403-421.