

Etude de l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'une habileté multi-segmentaire

Caroline Teulier

2002

Mémoire de D.E.A. S.T.A.P.S.
Université de Montpellier I.

1. Introduction

Le travail présenté ici tentera de rendre compte des réorganisations qualitatives du comportement qui ponctuent l'apprentissage d'une habileté complexe. Il s'agira d'identifier les coordinations spontanément adoptées par le sujet et leurs évolutions lors de l'apprentissage d'une tâche d'oscillations sur une balançoire.

Les premières études traitant de l'apprentissage moteur le concevaient plutôt comme un processus continu, comme l'affinement progressif de la réponse motrice. Cette conception s'illustre dans le principe de la loi puissance, supposée rendre compte de l'évolution des performances en fonction de la durée de pratique (Crossman, 1959).

Newell (1991) critique ces conceptions : ces études ne se basant que sur une analyse quantitative du comportement, elles rendent impossible la lecture de réorganisations qualitatives des coordinations que pourraient générer l'apprentissage moteur. Ceci l'amène à repenser la théorie selon laquelle l'apprentissage serait un processus continu et linéaire, et à mettre l'accent sur les discontinuités qui peuvent le caractériser. Cette réflexion fait notamment suite aux travaux de Bernstein (1967), initiateur des courants dynamiques et écologiques, qui voyait l'apprentissage moteur comme une suite de réorganisations des coordinations motrices.

A la suite de ces travaux, Zanone et Kelso (1992) avancent l'idée selon laquelle l'apprentissage pourrait constituer une transition de phase, entre un premier état stable caractérisant le comportement débutant, et un second état stable caractérisant le comportement expert. Cette tentative de modélisation de l'apprentissage moteur, basée sur la théorie des systèmes complexes loin de l'équilibre, fait suite aux résultats de leur expérimentation sur les coordinations bi-manuelles. Dans celle-ci, le fait de demander au sujet d'apprendre à produire un décalage de phase de 90° (le sujet n'étant initialement capable de produire que les coordinations en phase et en anti-phase), débouche à la fin de l'apprentissage, sur une modification qualitative du paysage des attracteurs, avec l'apparition de nouvelles solutions stables (le 90° et sa coordination symétrique, le 270°), accompagnée d'une diminution temporaire de la stabilité du pattern en anti-phase.

L'idée selon laquelle l'apprentissage pourrait être conçu comme une transition de phase est renforcée par quelques expérimentations qui ont montré des différences qualitatives marquées entre le comportement des débutants et le comportement des

experts. C'est le cas de Temprado, Della-Grasta, Farrell et Laurent (1997) qui, dans une étude sur le service en volley-ball, montrent un couplage en phase entre les articulations de l'épaule et du poignet chez les débutants alors que les experts les coordonnent en anti-phase. De même, Delignières, Nourrit, Sioud, Leroyer, Zattara et Micallef (1998) ont travaillé sur l'apprentissage de balancers en position mi-renversée aux barres parallèles. Leurs résultats ont permis de montrer que les coordinations spontanées adoptées par les débutants (décalage de phase de 0° entre les oscillations du centre de gravité et le balancer, et rapport de fréquence de 1/1) étaient qualitativement différentes de celles adoptées par les experts (décalage de phase de $90^\circ/270^\circ$ et rapport de fréquence 2/1). Dans ces deux cas, il semble impossible d'envisager une solution de continuité entre les deux coordinations, ce qui supporte l'idée d'une bifurcation qualitative entre deux modes successifs de coordination.

Mais l'hypothèse de la transition de phase se révèle exigeante d'un point de vue théorique. Elle suppose que quatre signatures typiques soient mises en évidence : (1) un accroissement de la variabilité au voisinage de la transition, (2) un accroissement du temps de relaxation : après perturbation à l'approche de la transition, le système mettra de plus en plus de temps à revenir à son état initial, (3) une modification abrupte du comportement, et (4) un phénomène d'hystérésis.

Zanone et Kelso (1997) ont cependant suggéré que la transition de phase ne constituait pas le seul modèle d'apprentissage possible. En effet, si le pattern à apprendre est relativement proche d'un pattern déjà présent dans le répertoire, l'apprentissage peut apparaître comme une simple modification paramétrique, un glissement de l'attracteur de la position initiale à la position finale, voire simplement à une sur-stabilisation du patron déjà présent (par augmentation de la précision et diminution de la variabilité). On parlera alors de situation de coopération, ou de convergence, en opposition à des situations de compétition, où le sujet devra modifier sa dynamique intrinsèque pour aller vers un patron non-spontané, à l'aide d'une transition de phase.

On sait cependant encore peu de choses de la dynamique de l'évolution des coordinations dans une tâche complexe. On peut évoquer le modèle du contrôle des degrés de liberté, proposé par Bernstein et développé par Newell et McDonald (1995) et Vereijken *et al.* (1997). Ce modèle suggère que le débutant assure la contrôlabilité du

système moteur par un gel initial des degrés de liberté articulaires, qui seront par la suite intégrés progressivement dans des unités fonctionnelles plus larges (« structures coordinatives ») permettant d'utiliser au mieux les forces passives du système. Néanmoins si ce modèle rend assez bien compte de l'évolution des coordinations dans certaines tâches, il semble incapable de servir de modèle à l'ensemble des situations (Caillou, Nourrit, Deschamps, Lauriot, & Delignières, sous presse). Par ailleurs, s'il offre une logique pour comprendre la succession des modes de coordination, il ne donne aucune indication sur la manière dont on passe d'un mode à l'autre.

A notre connaissance, une seule expérimentation a réellement cherché à analyser en continu l'évolution des coordinations au cours de l'apprentissage d'une habileté complexe. Nourrit, Delignières, Caillou, Deschamps et Lauriot. (sous presse) ont étudié l'apprentissage sur un simulateur de ski. L'analyse portait sur la modélisation dynamique des oscillations du chariot, et sur l'évolution des modèles au cours de l'apprentissage. Les résultats indiquent que l'ensemble des sujets adopte au début de l'expérimentation un comportement d'amortissement de type Rayleigh. Au terme de l'expérimentation, tous exploitent un comportement de type van der Pol. La transition entre les deux comportements n'apparaît pas abrupte. On observe une phase de transition, qui peut être relativement longue chez certains sujets, au cours de laquelle les deux comportements sont exploités en alternance, souvent d'un cycle à l'autre à l'intérieur du même essai. Les auteurs proposent une interprétation de ces résultats en termes de bifurcation nœud-col, caractérisée par une première phase mono-stable (Rayleigh), puis une phase de bi-stabilité et enfin une stabilisation finale dans un nouveau régime mono-stable (van der Pol). L'apprentissage serait caractérisé par un stationnement plus ou moins prolongé dans le régime de bi-stabilité.

Une seconde interprétation proposée par les auteurs suggère que le comportement pourrait être dès le début de la pratique sous-tendu par un modèle hybride, comportant simultanément les termes d'amortissement de Rayleigh et de van der Pol. Dans ce cas, l'apprentissage pourrait ne constituer qu'une évolution paramétrique d'un modèle unique.

Ces deux interprétations ne pourraient être départagées que dans un protocole où aucune solution de continuité ne pourrait exister entre le comportement du débutant et celui de l'expert. C'était le cas pour l'expérimentation de Delignières et al. (1998) qui

n'avait pu être menée à son terme de part les problèmes traumatologiques engendrés par la tâche. Nous avons donc tenté de construire un protocole reposant sur des contraintes mécaniques similaires, tout en autorisant une pratique plus continue de la tâche.

A priori, l'hypothèse d'une transition graduelle du comportement débutant au comportement expert, avec une phase d'alternance entre les deux comportements, nous semble plus plausible. Une transition abrupte supposerait un apprentissage de type *insight*, un phénomène rarement observé dans le cadre de l'acquisition des habiletés motrices. Si l'on admet d'une part que la transition du comportement débutant au comportement expert est graduelle, et d'autre part qu'il n'existe pas de solution de continuité entre les deux modes de coordination, seule l'hypothèse d'une coexistence des deux coordinations exploitées en alternance au cours d'une période de transition semble pouvoir être retenue.

En ce qui concerne les coordinations du débutant, de nombreuses études ont mis en évidence des comportements spontanés identiques chez l'ensemble des novices, et qualitativement différents de ceux des experts. Ce comportement semble déterminé par l'interaction des différentes contraintes du système (Newell, 1986) et par un critère de facilité de contrôle du système, avec notamment une synchronisation forte des oscillateurs (synchronisation des points de revirement, et adoption de rapports de fréquences simples ; voir Zanone & Kelso, 1992 ; Beek *et al.*, 1992 ; Walter et Swinnen, 1995 ; Delignières *et al.*, 1998). Le comportement de l'expert semble lui renvoyer à une utilisation optimale des propriétés mécaniques du système, permettant l'obtention d'un mouvement efficient (Delignières *et al.*, 1998 ; Nourrit *et al.*, 2000 ; Durand *et al.*, 1994 ; Vereijken, 1991).

Ces coordinations spontanées présentent une certaine résistance. Dans l'étude sur les barres parallèles (Delignières *et al.*, 1998), les sujets ne les avaient toujours pas dépassées après 80 essais. Elles semblent néanmoins permettre aux sujets d'atteindre des niveaux de performance tout à fait acceptables. En effet, les expériences de Delignières *et al.* (1998) et de Nourrit *et al.* (sous presse) ont montré que les sujets étaient capables d'atteindre une amplitude quasi similaire à celle des experts en utilisant un mode de coordination débutant. La résistance des coordinations initiales semble cependant dépendre de la difficulté de la tâche, Nourrit (2000) ayant montré que les

changements qualitatifs sur simulateur de ski arrivaient beaucoup plus tard lorsqu'on transformait celui-ci en « mono-ski » (voir aussi Nourrit *et al.*, sous presse).

Les résultats récemment obtenus sur ces transitions lors de l'apprentissage permettent en outre de modifier le regard porté sur les relations entre coordinations spontanées et coordinations expertes. On a souvent dit que le comportement expert devait s'imposer *contre* les coordinations spontanées, en montrant qu'une déstabilisation du pattern initial permettait au sujet de transiter plus vite vers le pattern à apprendre (Walter & Swinnen ; 1995). Les propositions de Zanone et Kelso (1997) permettent déjà de moduler cette affirmation, en fonction de la nature de la situation (convergence ou compétition) à laquelle est confrontée le sujet.

L'étude réalisée par Nourrit *et al.* (sous presse) permet d'envisager différemment les rapports entre les coordinations spontanées et les coordinations qui vont leur succéder. Les résultats obtenus suggèrent que les coordinations spontanées subissent dans une première phase une transformation paramétrique, qui va installer les conditions pour l'apparition du second mode de coordination. Dans ce travail sur le simulateur de ski, le premier modèle de type amortissement de Rayleigh permet un accroissement de la fréquence et de l'amplitude (qui devient similaire à celle des experts), et installe ainsi les conditions de l'émergence de l'amortissement van der Pol. Ce résultat permet de repenser l'intérêt de la coordination initiale, qui permettrait en fait aux sujets d'installer les conditions requises à sa substitution par un comportement plus adapté aux contraintes de la tâche.

Même dans des situations supposées de compétition, sans solution de continuité entre deux modes successifs de coordination, nous pouvons donc faire l'hypothèse d'une coopération entre les coordinations débutantes et les coordinations expertes, dans le sens où l'évolution des premières serait une condition nécessaire à l'installation des secondes. Cette coopération pourrait ainsi justifier leur coexistence durant la phase de transition. Nous nous attendons donc à observer une évolution graduelle des coordinations, mêlant évolutions paramétriques et sauts qualitatifs.

Afin de tester ces hypothèses, nous avons construit une tâche régie par les mêmes principes que celle de Delignières *et al.* (1998) aux barres parallèles mais présentant des contraintes moindres. L'expérience est réalisée sur une balançoire, constituée d'une planche de bois oscillant par rapport à un support fixé au sol

(Figure 1). La planche est reliée au support par quatre tubes métalliques de 50 cm, ce qui lui permet de demeurer horizontale tout au long de ses oscillations. Le sujet était debout sur la planche et devait créer et entretenir des oscillations d'avant en arrière, fluides et régulières.

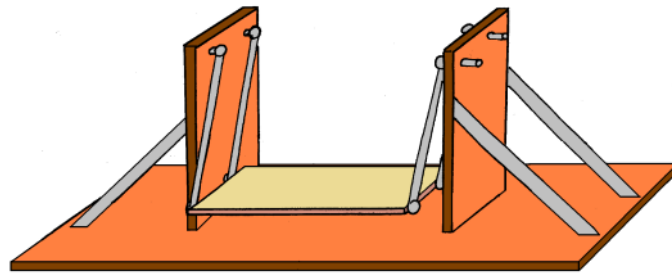


Figure 1. : *Dispositif expérimental*

Le système ainsi conçu peut être considéré comme un pendule complexe articulé. Le mouvement pendulaire de la planche présente deux points de revirement, vers l'arrière et vers l'avant (définis en fonction de l'orientation du corps du sujet). Nous appellerons le balancer arrière le déplacement pendulaire allant du point de revirement avant au point de revirement arrière. De manière symétrique, le balancer avant correspondra au déplacement pendulaire allant du point de revirement arrière au point de revirement avant. Un cycle complet comprend donc un balancer arrière et un balancer avant. Chaque balancer se compose d'une phase descendante (entre le point de revirement et le passage en verticale basse de l'axe de rotation) et d'une phase ascendante. Lors des phases descendantes, le poids effectue un travail moteur. A l'inverse, il effectue un travail résistant lors des phases ascendantes.

Le sujet entretient les oscillations en effectuant des mouvements de flexion/extension du corps. On considère que le système balançoire/sujet peut être modélisé de manière simple par le couplage de deux systèmes oscillants : (1) les oscillations pendulaires de la balançoire autour de son axe, et (2) les oscillations verticales du centre de gravité du sujet au-dessus de la planche. Une utilisation optimale des propriétés mécaniques du système suggère que le sujet abaisse son centre de gravité lors des phases descendantes, puis réalise une extension du corps lors des phases ascendantes. Si l'apprentissage débouche sur la découverte des solutions exploitant au mieux la mécanique du système, on s'attend donc à mettre en évidence chez des sujets experts une coordination 2 :1 entre les deux systèmes oscillants, et un décalage de phase de 90° pour le balancer avant et de 270° pour le balancer arrière.

Les résultats obtenus par Delignières *et al.* (1998) suggèrent que les débutants devraient exploiter une coordination plus simple, caractérisée par un rapport de fréquence 1 :1 et une synchronisation des points de revirement (décalage de phase 0°). En d'autres termes, on fait l'hypothèse que les débutants ne devraient forcer le système qu'une seule fois par cycle, et que ce forçage serait initié au début du balancer, au point maximal arrière. Cette première coordination devrait persister quelques temps ; tout en évoluant de manière paramétrique (notamment par une évolution du décalage de phase). On s'attend ensuite à observer une phase de bi-stabilité au cours de laquelle les deux modes de coordination seraient exploités en alternance, au cours d'un même essai.

2. Méthode

2.1. Sujets

Six sujets masculins, d'âge moyen de 26,3 ans (s.d.: 2,3), ont participé volontairement à cette expérience sans percevoir de rémunération. Leurs caractéristiques anthropométriques sont résumées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Caractéristiques anthropométriques des sujets.

| Sujet | Age | Taille (cm) | Poids (Kg) |
|-------------|------|-------------|------------|
| 1 | 26 | 180 | 75 |
| 2 | 23 | 169 | 60 |
| 3 | 26 | 167 | 61 |
| 4 | 25 | 190 | 70 |
| 5 | 29 | 187 | 75 |
| 6 | 29 | 178 | 71 |
| Moyenne | 26,3 | 178,5 | 68,6 |
| Ecart- type | 2,3 | 9,3 | 6,6 |

2.2. Tâche expérimentale

L'expérience a été réalisée sur une balançoire. Celle-ci était composée de deux portants de bois soutenant les axes de rotation de la plate-forme, qui oscillait d'avant en arrière (voir figure 1). La tâche consistait à réaliser et à entretenir des balancers en position debout.

2.3. Procédure :

La tâche a été réalisée durant cinq sessions, pendant cinq jours consécutifs. Chaque session comportait dix essais de quinze secondes, avec une minute de repos entre les essais. Les sujets devaient se positionner sur la plate-forme avec les pieds légèrement écartés, en gardant les mains derrière le dos. Il leur était demandé de se balancer « en essayant d'être le plus fluide possible ». La consigne était donnée au début de chaque session. Aucune autre indication verbale n'était donnée quant à la manière de procéder. Deux semaines plus tard, un post-test composé d'une session était réalisé.

2.4. Recueil des données

Les sujets étaient équipés de dix marqueurs réfléchissants (figure 2), soit cinq marqueurs de chaque côté du corps. Les localisations étaient les suivantes : têtes humérales (1 et 2), grands trochanters (3 et 4), genoux (5 et 6), malléoles externes (7 et 8), pieds (9 et 10). La position de chaque marqueur était signalée sur la peau (ou sur les vêtements moulants) au feutre indélébile, afin d'assurer un repositionnement précis au fil des sessions. D'autres marqueurs étaient situés sur le dispositif. Un marqueur (11) était

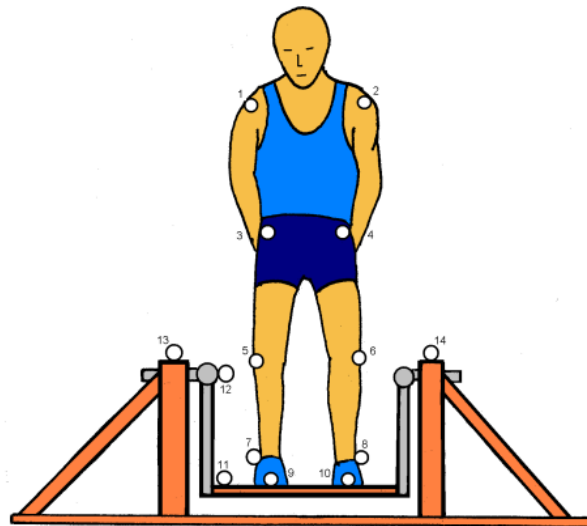


Figure 2. : Position du sujet et emplacement des différents marqueurs.

situé sur la plate-forme à droite du sujet, et un autre (12) au niveau de l'axe de rotation de la balançoire. Enfin deux marqueurs (13 et 14) étaient fixés au sommet des portants droit et gauche.

Les mouvements des sujets étaient enregistrés en trois dimensions au moyen d'un système VICON 370 (BIOMETRICS) à quatre caméras, à une fréquence d'acquisition de 50Hz. Les caméras infrarouges étaient positionnées de façon à n'avoir aucune perte de marqueur. L'enregistrement était initié, lors de chaque essai, à la fin du premier balancer produit par le sujet.

2.5. Analyse des données

Les données se présentaient sous forme de séries temporelles tridimensionnelles (x , y , et z), pour chaque marqueur. Dans un premier temps, nous avons effectué une rotation du repère, de manière à aligner l'axe des x sur la droite définie par les positions moyennes des marqueurs 13 et 14 (définissant l'axe transversal de la balançoire).

Faisant l'hypothèse que les informations principales liées aux mouvements de la balançoire et aux coordinations produites se situeraient dès lors dans le plan sagittal, les coordonnées des marqueurs ont été par la suite traitées en deux dimensions (y et z). Toutes ces données ont été lissées à l'aide d'un filtre Butterworth à une fréquence de coupure de 10Hz. Puis les coordonnées ont été redéfinies dans ce plan sagittal en prenant pour origine la position instantanée du marqueur 5 (pied droit).

Ces données ont été réduites par le calcul des angles articulaires caractérisant la coordination (hanche, genou). Puis nous avons calculé deux séries temporelles relatives d'une part aux oscillations de la plate-forme, et d'autre part à l'évolution de la distance entre le centre de gravité et le pied. Ceci nous a permis de calculer la phase relative entre ces deux oscillateurs selon la méthode de l'estimation ponctuelle. Ces calculs vont être détaillés dans les paragraphes suivants.

Les coordonnées des centres de gravité segmentaires, puis du centre de gravité global ont été calculées par la méthode de Winter (1990, Table 3.1., pp. 56-57), basée sur les rapports entre le poids corporel total et le poids des différents segments, et sur les rapports entre les positions des centres de masse segmentaires.

2.5.1. Calcul des angles corporels

L'angle β_2 est formé par l'axe genou/hanche et l'axe hanche/épaule. La variabilité de cet angle, vue au travers de l'écart type, permet de caractériser l'évolution de la participation de l'articulation de la hanche lors du mouvement. L'angle β_3 est formé par l'axe

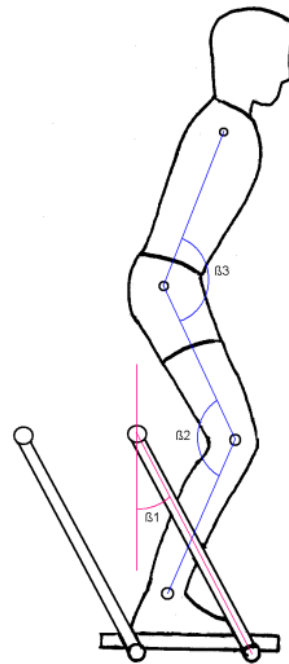


Figure 3. : Visualisation des différents angles calculés

cheville/genou et par l'axe genou/hanche. Il correspond à la flexion/extension des membres inférieurs.

2.5.2. Calcul de la phase relative

β_1 est défini comme l'angle formé par l'axe marqueur 11-marqueur 12 et la verticale. Il correspond à l'amplitude instantanée de la déviation de la plate-forme par rapport à sa position de repos. β_1 est calculé par trigonométrie, puis filtré avec un filtre récursif de type Butterworth. Nous avons dans un premier temps calculé son amplitude, sa fréquence, et sa fluidité moyenne par essai. La fluidité est calculée à l'aide de la corrélation (r) entre la position et l'accélération de β_1 . Nous utilisons l'indice d'harmonicité proposé par Mottet et Bootsma (1999) exprimant le pourcentage représenté par les non-linéarité dans la variance totale ($1-r^2$). Ensuite, la dérivée première ($\dot{\beta}_1$) est calculée, puis filtrée selon la même procédure. Les deux séries sont ensuite ré-étalonnées dans l'intervalle $[-1 ; 1]$, puis la phase de β_1 est calculée selon la formule suivante :

$$\phi = \text{arctg}(\dot{\beta}_1/\beta_1)$$

Pour le second oscillateur, nous avons calculé la distance d entre le barycentre des marqueurs 9 et 10 (pieds) et le centre de gravité. La phase relative correspond à la valeur de la phase de β_1 lorsque d est à un minimum (c'est-à-dire lorsque la phase du second oscillateur est à 0). En d'autres termes, nous mesurons la phase de β_1 lors de l'initiation du forçage de la plate-forme. Un algorithme de recherche de pic nous a permis de localiser ces minima, puis de déterminer la phase de β_1 correspondante.

2.3.3 Analyse qualitative du décalage de phase

Le mode de coordination produit par le sujet pouvant évoluer au cours d'un même essai, nous avons réalisé une analyse cycle à cycle. Afin de rendre la lecture des résultats plus parlante, nous avons catégorisé les phases relatives selon la logique suivante :

20° : quand le sujet force entre 0 et 40°

55° : quand le sujet force entre 40 et 70°

90° : quand le sujet force entre 70 et 120°

140° : quand le sujet force entre 120 et 160°

180° : quand le sujet force entre 160 et 200°

220° : quand le sujet force entre 200 et 240°

265° : quand le sujet force entre 240 et 290°

305° : quand le sujet force entre 290 et 320°

340° : quand le sujet force entre 320 et 360°

Si les sujets forcent plusieurs fois dans le cycle (par exemple 140° puis 360°), on attribue à ce cycle ces deux valeurs (soit selon notre exemple une coordination 140°/360°), ce qui correspond à un rapport de fréquence de type 2/1.

Enfin nous avons relevé les associations de coordinations adoptées par les sujets entre le cycle n et le cycle $n + 1$. Chaque association est étiquetée selon les coordinations adoptées successivement (ex : cycle 1 = 340°, cycle 2 = 180°, association = 340°-180°).

2.3.4 Traitements statistiques

Pour les variables d'amplitude, de fréquence et de fluidité de l'angle β_1 , nous avons effectué des ANOVA à un facteur (Session), avec 6 niveaux de mesures répétées. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été testées avant traitement. Un seuil de signification de 0.05 est retenu. Compte-tenu d'une violation probable des hypothèses de sphéricité, la probabilité est corrigée selon la procédure de Greenhouse-Geisser.

Suite au test de l'effet Session, des contrastes spécifiques sont analysés, entre la première session et les autres sessions d'apprentissage, et entre la session 5 et le post-test, afin de tester la durabilité de l'apprentissage.

3. Résultats

3.1. Amplitude et fréquence de la plate-forme

3.1.1. Amplitude de β_1

Pour tous les sujets, nous avons constaté une augmentation de l'amplitude de 28,3° ($\pm 14^\circ$) pour la première session à 56,5° ($\pm 15^\circ$) pour la cinquième session en moyenne. Un effet du facteur session est obtenu ($F_{5,25}=23$ $p<.01$). Les tests de contraste

indiquent une différence significative entre la session 1 et toutes les autres sessions. Par contre, il n'y a pas de différence significative entre la session 5 et le post-test ($F_{1,5} = 2,8$, $p > .05$).

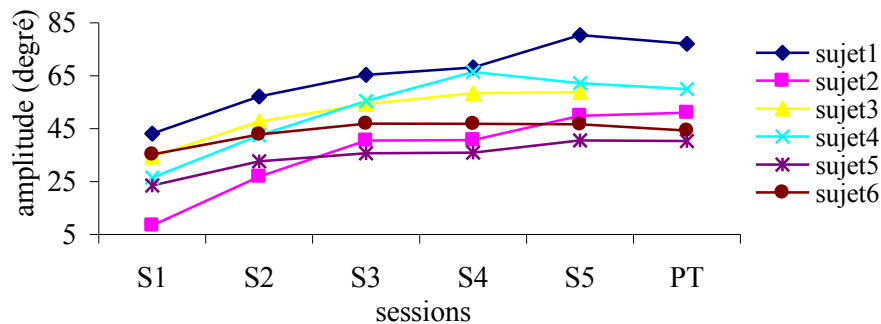


Fig.4. Evolution de l'amplitude de l'angle β_1 (amplitude de la plate-forme)

3.1.2 fréquence de β_1

Pour tous les sujets, nous avons constaté une diminution de la fréquence d'oscillation de 1,31 Hz ($\pm 0,13$ Hz) pour la première session à 1,20 Hz ($\pm 0,13$ Hz) pour la cinquième session. Un effet du facteur session est obtenu ($F_{5,25} = 25,14$, $p < .01$). Les tests de contraste indiquent une différence significative entre la session 1 et le post-test mais pas entre la session 5 et le post-test.

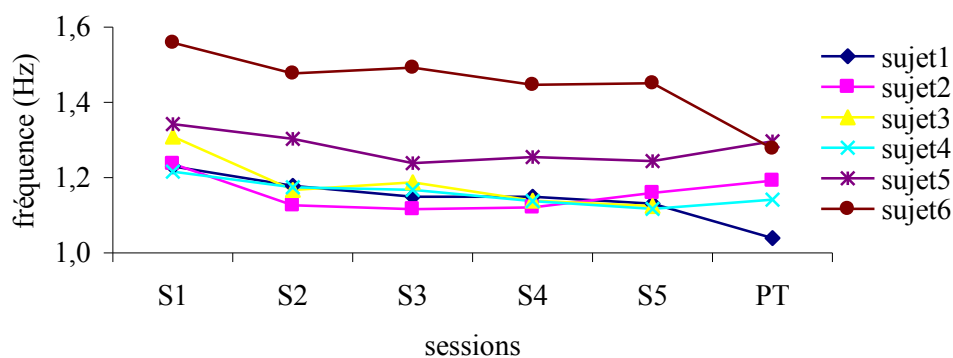


Figure5 : Fréquence de l'angle β_1 (fréquence de la plate-forme)

3.1.3. La fluidité

Pour tous les sujets, nous avons constaté une diminution de l'indice de fluidité (plus il se rapproche de 0, plus l'oscillation est harmonique) de 0,19 ($\pm 0,025$) pour la première session à 0,15 ($\pm 0,01$) pour la cinquième session en moyenne. Un effet du facteur session est obtenu ($F_{5,25} = 4,46$; $p < .01$). Les tests de contraste indiquent une différence significative entre la session 1 et les sessions 3,4 et 5. Par contre, il n'y a pas de différence significative entre la session 5 et le post-test ($F_{1,5} = 2,8$; $p > .05$).

3.2. Résultats qualitatifs sur le décalage de phase

3.2.1. Evolution des coordinations

Après avoir catégorisé les différents modes de coordination, nous avons recherché ceux qui apparaissent le plus fréquemment dans chaque session. Nous avons calculé le pourcentage que représentait chacun de ces modes par rapport aux coordinations adoptées pendant toute la session. Dans le tableau ci-dessous, nous n'avons relevé que les modes les plus représentés. Les coordinations où apparaissent deux moments de forçage correspondent à des rapports de fréquence de 2/1 entre le centre de gravité et la plate-forme, alors que les autres coordinations ont un rapport de fréquence de 1/1 (soit un seul forçage par cycle).

Lors de la première session, les sujets forcent majoritairement la plate-forme dans la phase ascendante du balancer arrière (305° à 340°), avec un rapport de fréquence simple (1/1). Cependant, on remarque que plusieurs modes de coordination différents sont produits (décalage de phase autour de 140° ou 180° pour les sujets 3, 4, 5 et 6), le forçage autour du point de revirement arrière étant majoritaire.

Par la suite, les sujets ont tendance à déstabiliser le premier comportement tout en créant une nouvelle coordination autour du point de revirement avant (220° ou 180°). Cette substitution arrive lentement par un jeu d'alternance des coordinations débutantes et débrouillées au cours d'une même session ou d'un même essai. De plus on voit que les sujets cherchent à rapprocher leur moment de forçage des points de revirement par une simple paramétrisation du décalage (stabilisation soit sur le 340° soit sur le 180°). Lors de la dernière session, les sujets finissent par forcer la plate-forme vers le point de revirement avant (sauf le sujet 6), en restant surtout sur des rapports de

fréquences simples même si l'on voit se stabiliser chez certains sujets (sujet1 notamment) des rapports de fréquence plus complexes (forçage à 180° puis à 360°).

Tableau 2: Pourcentage d'apparition des coordinations pour chaque sujet au cours des sessions

| coordi nation | 20° | 140° | 180° | 220° | 305° | 340° | 20°/ 180° | 20°/ 305° | 140°/ 305° | 180°/ 305° | 180°/ 340° | 220°/ 340° | % total |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| sujet 1 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | | | | | 40 | 58 | | | | | | | 98 |
| S2 | | | 19 | | 23 | 24 | | | | 9 | 17 | | 92 |
| S3 | | | 18 | | | 51 | | | | | 24 | | 93 |
| S4 | | | 5 | | 6 | 52 | | | | | 13 | 14 | 90 |
| S5 | | | 38 | | | 12 | | | | 6 | 30 | | 86 |
| P-T | | | 27 | | 13 | 23 | | | | | | | 86 |
| sujet 2 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | | | | 15 | 59 | 5 | | 4 | | | | | 83 |
| S2 | | | | 11 | 76 | | | 4 | | | | | 91 |
| S3 | | | | 33 | 57 | | | 3 | | | | | 93 |
| S4 | | | | 7 | 69 | 8 | | 4 | | | | | 88 |
| S5 | | 44 | 44 | | | | 4 | | | | | | 92 |
| P-T | | | | 35 | 35 | 6 | | 10 | | | | | 86 |
| sujet 3 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | | 4 | | 33 | 45 | | | | | | | | 82 |
| S2 | | | | 35 | 55 | | | | | | | | 90 |
| S3 | | 6 | 12 | 38 | 35 | | | | | | | | 91 |
| S4 | | 6 | 20 | 40 | 28 | | | | | | | | 94 |
| S5 | | 8 | 56 | 19 | 7 | | | | | | | | 90 |
| sujet 4 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | | | 3 | 21 | 73 | | | | | | | | 97 |
| S2 | | | 28 | 43 | 25 | | | | | | | | 96 |
| S3 | | | 29 | 29 | 34 | | | | 5 | | | | 97 |
| S4 | | | 58 | 11 | 8 | | | | 18 | 5 | | | 100 |
| S5 | | | 40 | 32 | 9 | | | | | 8 | | | 89 |
| P-T | | | 63 | 29 | | | | | | | | | 92 |
| sujet 5 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | | 11 | 11 | 8 | 57 | | | | | 4 | | | 91 |
| S2 | | 19 | 19 | | 35 | 11 | | | | 3 | | | 87 |
| S3 | | 64 | 6 | | 9 | | | | 10 | | | | 89 |
| S4 | | 10 | 19 | | 22 | 37 | | | 7 | | | | 95 |
| S5 | | 10 | 24 | | 29 | 10 | | | 7 | 9 | | | 89 |
| P-T | | 49 | 34 | | 8 | | | | | | | | 91 |
| sujet 6 | | | | | | | | | | | | | |
| S1 | 27 | 18 | 6 | | | 30 | | | | | | | 81 |
| S2 | | 6 | 23 | | | 51 | | | | 6 | | | 86 |
| S3 | | | | | | 98 | | | | | | | 98 |
| S4 | | 6 | 21 | | | 71 | | | | | | | 98 |
| S5 | | | | | | 98 | | | | | | | 98 |

3.2.2. Associations de coordination

Les résultats présentés sur le graphique ci-dessous montrent les associations adoptées le plus souvent par les sujets lors des sessions 1 et 5. Tout d'abord, ces résultats montrent que dans l'ensemble, les sujets ont tendance à reproduire les mêmes comportements d'un cycle à l'autre en s'appuyant constamment sur des coordinations stables comme le 340°, le 305° et le 180° (pour la dernière session).

De plus, on peut remarquer que les sujets lors de la première session utilisent préférentiellement un moment de forçage situé vers le point de revirement arrière sur lequel ils reviennent fréquemment, alors que le point de revirement avant semble devenir un deuxième point d'ancrage lors de la dernière session.

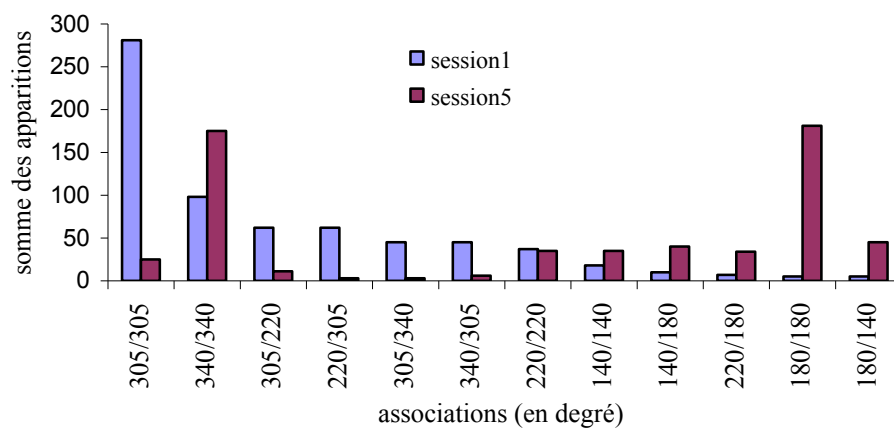


Figure 6 : Association de coordination les plus fréquentes pour les sessions 1 et 5.

3.3. Evolution des angles corporels

L'amplitude et l'écart type des différents angles corporels ont été calculés cycle par cycle et moyennés par essai puis par session.

Au niveau de l'angle β_2 (articulation de la hanche), les sujets oscillent en moyenne avec une ouverture de hanche (β_2) de 147° ($\pm 15^\circ$) lors de la première session et de 143° ($\pm 11^\circ$) lors de la dernière session.

Tableau 2 : Ecart type moyen par session de l'angle β_2 (articulation de la hanche).

| ET β_2 | sujet1 | sujet2 | sujet3 | sujet4 | sujet5 | sujet6 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| session1 | 9 | 39 | 30 | 88 | 34 | 8 |
| session2 | 10 | 70 | 43 | 23 | 22 | 10 |
| session3 | 8 | 35 | 85 | 21 | 6 | 8 |
| session4 | 9 | 65 | 56 | 19 | 7 | 7 |
| session5 | 10 | 27 | 80 | 15 | 9 | 6 |
| Post-test | 11 | 30 | | 20 | 8 | 7 |

Si l'on ne note pas d'évolution significative au niveau de l'ouverture de la hanche au cours des sessions, on relève de grandes différences inter et intra-individuelles, qui prouvent que la hanche intervient de manière très diverse, même au cours d'un même essai.

Au niveau de l'angle β_3 (articulation du genou), lors de la première session, les sujets ont en moyenne une extension des membres inférieurs de $149^\circ (\pm 13^\circ)$, quasi similaire à celle de la dernière session qui est de $146^\circ (\pm 15^\circ)$.

Tableau.3 : Ecart type moyen par session de l'angle β_3 (articulation du genou).

| ET β_3 | sujet1 | sujet2 | sujet3 | sujet4 | sujet5 | sujet6 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| session1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 13 |
| session2 | 6 | 4 | 5 | 10 | 6 | 12 |
| session3 | 8 | 9 | 6 | 13 | 7 | 14 |
| session4 | 8 | 4 | 7 | 16 | 5 | 12 |
| session5 | 9 | 34 | 11 | 15 | 5 | 12 |
| Post-test | 7 | 9 | 8 | 14 | 6 | 14 |

On ne remarque pas de différence entre les sessions au niveau de l'angle β_3 , cependant, les écart types varient beaucoup moins qu'au niveau de la hanche que cela soit au niveau inter ou intra-individuel.

Il semble qu'une analyse plus fine soit nécessaire pour comprendre le déroulement de la coordination mise en place. Les graphiques ci-dessous présentent donc l'évolution simultanée des angles β_2 et β_3 au cours de différents essais du sujet 1, où celui-ci produit des décalages de phase différents.

Le moment de forçage est initié par une flexion des genoux à différents temps, alors que l'articulation de la hanche suit le mouvement de la plate-forme.

Lors des premiers essais (panel C), on voit que la flexion du genou est déclenchée quand la hanche est en extension maximale, correspondant au point de

revirement arrière. Ceci correspondrait à un forçage à 340° de décalage de phase. Inversement, on note sur le panel (B) que la flexion des membres inférieurs est produite juste avant la flexion de la hanche, le sujet produisant à ce moment là un décalage de phase de 180° environ. Le premier graphique (panel A) correspond à une concaténation des deux coordinations vues précédemment, soit à une coordination de type 2/1 ($180^\circ/360^\circ$), où l'on a deux flexions des genoux pour une seule de la hanche. Cependant, on observe une légère flexion de la hanche juste avant le deuxième forçage du genou qui pourrait correspondre à une réorganisation de l'équilibre postural en prévision du forçage à venir.

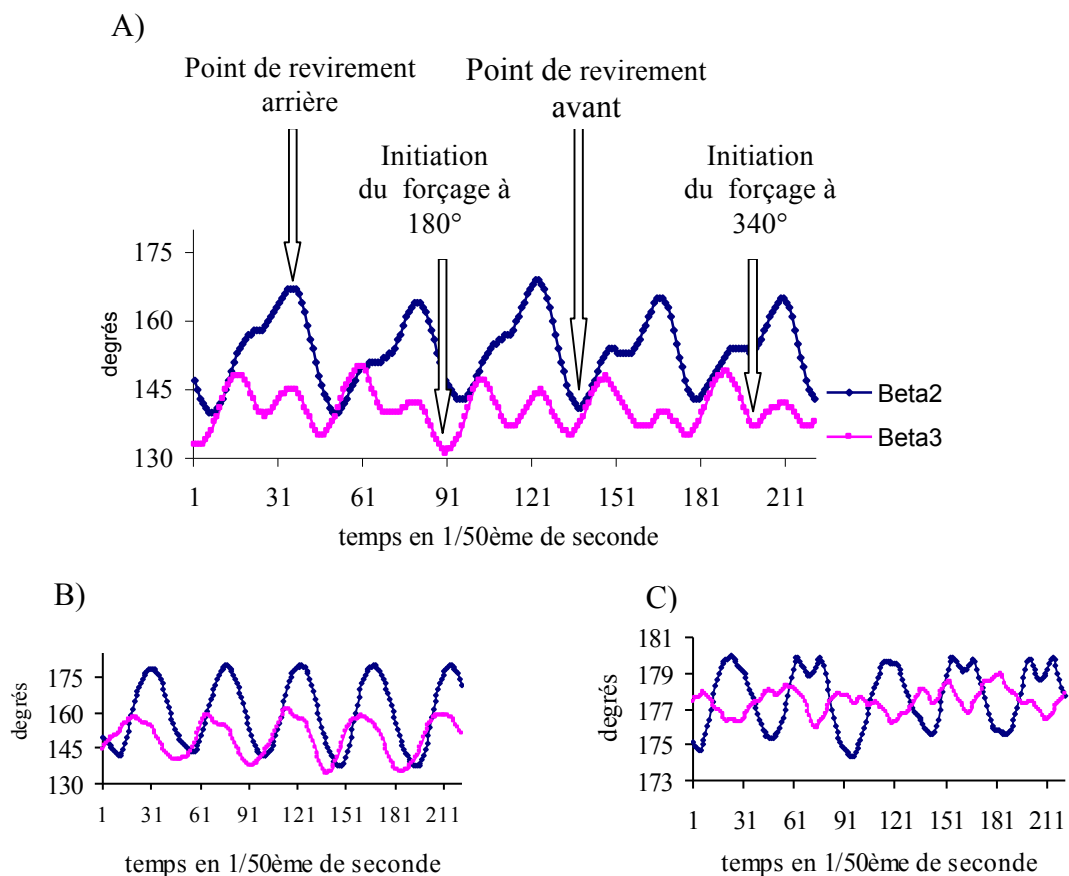


Figure 7: Evolution des angles β_2 et β_3 du sujet 1 sur 5 cycles. Panel A) session 5 essai 4 (production d'un décalage de phase de $180^\circ/340^\circ$). Panel B) session 2 essai 10 (180°). Panel C) session 1 essai 1 (340°).

4. Discussion

4.1. Evolution de la performance

D'une façon générale, on peut voir que tous les sujets ont progressé tant au niveau de l'amplitude que de la fréquence du mouvement. Au cours de l'expérimentation les sujets doublent leurs amplitudes (quasiment dès la troisième session), tout en conservant un écart type relativement faible et asservi au degré d'amplitude. De plus la non-significativité du contraste effectué entre la session 5 et le post-test nous permet de dire qu'il y a eu apprentissage, puisque les sujets sont capables 15 jours après de reproduire une performance similaire.

Il en est de même pour la fréquence d'oscillation, qui diminue de façon significative dès la deuxième session, avec des écarts types relativement stables sauf chez le sujet 2 et sur le post-test où l'on observe un accroissement de la variabilité.

De plus, la diminution de l'indice d'harmonicité montre que les sujets augmentent la fluidité de leur mouvement au cours des sessions, même si l'indice augmente lors du post test chez quelques sujets .

L'évolution de ces trois paramètres nous permet d'appuyer la validité de la consigne sur la fluidité, comme l'avait déjà montré Vereijken (1991). En effet, sans contraindre le sujet à se fixer des objectifs quantitatifs en terme de performance, cette consigne l'amène quand même à une augmentation de la performance lui permettant de rapprocher son mouvement à celui d'un oscillateur harmonique. On peut donc supposer que l'acquisition d'une certaine amplitude liée à une certaine fréquence semble être inhérente à l'obtention d'une certaine fluidité du mouvement.

Cependant, l'analyse de ces paramètres ne nous permet pas de juger si cette consigne a réellement permis au sujet de construire une coordination parfaitement symétrique, représentative d'une fluidité parfaite au niveau des oscillations, comme nous l'attentions.

4.2. Evolution des coordinations spontanées

Pour tenter d'appréhender le comportement du sujet à un niveau plus qualitatif, nous avons donc regardé l'évolution de ses coordinations au cours du temps, afin de

voir si le sujet parvenait ou non à produire un comportement plus approprié aux propriétés mécaniques de la tâche.

4.2.1. les coordinations spontanées du débutants

De manière générale, on note que tous les sujets forcent le système dans la phase ascendante du cycle arrière, soit entre 290° et 360° de la phase de la plate-forme. Ces coordinations sont les plus stables chez tous les sujets et représentent un point d'ancrage très fort. En effet, même si les sujets vont parfois forcer la plate-forme juste après le point de revirement avant, le nombre des associations comportant un décalage de phase de 305° met en évidence un retour systématique sur la coordination la plus stable quand le sujet tente un nouveau forçage.

Les coordinations qui émergent présentent donc bien un rapport de fréquence de 1/1 entre les oscillations de la plate-forme et celle du centre de gravité, soit un seul forçage du système par cycle. Cependant, l'on s'attendait au regard de la littérature à trouver une toute autre valeur du décalage de phase. En effet, toutes les expériences menées sur l'apprentissage moteur, et ce quel que soit le nombre de degré de liberté mis en jeu dans la tâche, mettaient en avant des décalages de phase de 0° ou de 180° chez les débutants (Zanone et Kelso, 1992 ; Vereijken, 1991, Delignières *et al.*, 1998). Tous les forçages relevés par Delignières *et al.* (1998) apparaissaient donc dans la première partie du cycle correspondant au cycle avant, ce qui semble logique puisque les sujets sont plus habitués dans la vie courante à exploiter cet espace avant.

Cependant, on peut penser que le côté dissymétrique de notre tâche d'un point de vue anatomique est à l'origine de ces résultats atypiques. En effet, au début de l'apprentissage, les sujets ont tendance à se laisser porter par les mouvements de la balançoire. Pour cela, ils réalisent une flexion au niveau de l'articulation de la hanche lors du cycle avant, associée à une extension de l'articulation du genou. A l'inverse, ils effectuent une flexion des genoux et une extension de la hanche lors du cycle arrière. Or le forçage de la balançoire permettant une injection d'énergie dans le système semble se faire à l'aide d'un jeu de flexion/extension du genou (voir figure.7). Ceci serait donc plus simple à réaliser lors du cycle arrière, où le forçage suit le sens du mouvement. Il semble donc logique que les sujets, toujours dans l'optique de rendre le système le plus

contrôlable possible (Bernstein, 1967), soient plus entreprenants pendant le cycle arrière, pourtant moins exploité dans toutes les autres études.

De plus, on voit que les sujets contrôlent le système à l'aide d'un jeu d'ouverture/fermeture de la hanche qui sert à rééquilibrer le sujet lorsque celui-ci est déstabilisé. Ce rôle est extrêmement important car sur cette tâche, le premier problème auquel les sujets sont confrontés est le maintien de l'équilibre, comme le montre la forte variabilité de l'écart type de β_2 . Certains sujets sont plus stables que d'autres (sujet 1,6), d'autres le deviennent au cours des sessions (sujet 4,5). On peut d'ailleurs remarquer que seuls les sujets qui obtiennent un équilibre satisfaisant paraissent par la suite en mesure de produire des coordinations de type 2/1.

4.2.2. Evolution des coordinations spontanées

Par la suite, on observe une déstabilisation de ces coordinations situées à l'approche du point de revirement arrière, accompagnée d'une augmentation du nombre de forçages situé autour du point de revirement avant. Cette coordination autour du 180° devient majoritaire chez cinq sujets (le sujet 6 fait lui le cheminement inverse). Mais ce décalage n'est atteint chez certains qu'après une évolution progressive du moment de forçage. En effet, on observe chez les sujets 2, 3 et 4 dans un premier temps l'apparition d'un décalage de phase de 220° qui va par la suite perdre en stabilité pour laisser plus de place au 180° . Cette évolution peut être vue comme une simple évolution paramétrique du décalage puisque les sujets se contentent de garder un forçage dans la même partie du cycle tout en se rapprochant du point de revirement avant. Cette même progression est observée chez les sujets 1 et 5, qui se rapprochent eux du point de revirement arrière. On remarque d'ailleurs que cette paramétrisation prend fin très tôt pour le sujet 1 (3^{ème} session) alors que les autres sujets produisent encore un peu l'ancien décalage.

Tous les sujets adoptent au final un comportement complètement différent par rapport à leurs coordinations spontanées en terme de décalage de phase. Cependant, on observe que les sujets restent encore sur un rapport de fréquence de 1/1 en fin d'apprentissage, même si chez certains des modes de coordinations avec deux forçages par cycle commencent à émerger voir à se stabiliser (cf sujet 1). Il y a donc eu une transition au niveau des coordinations adoptées.

4.2.3. Caractéristiques de cette évolution

Afin d'observer plus finement cette transition, nous allons nous focaliser sur l'étude du sujet n°1 qui est le seul à avoir stabilisé une coordination de type 2/1 de façon prédominante lors de la dernière session, tout en oscillant à grande amplitude (80°) et à fréquence faible (1.1Hz). C'est donc le sujet qui semble s'être le mieux servi des propriétés du système pour répondre aux exigences demandées. Cependant, ce sujet reste sur des moments de forçage situés à l'approche de chaque point de revirement alors que nous nous attendions à voir chez les sujets confirmés des moments de forçage situés au passage en verticale basse, décalages que nous n'observons jamais dans cette expérience.

Lors de sa première session on note une grande stabilité sur deux coordinations que sont le 305° et le 340°. Au fur et à mesure des sessions, le sujet force de moins en moins à 305°, en continuant son forçage à 340°. De manière simultanée, il développe un décalage de 180° dont l'apparition semble se faire de façon continue. En effet, ce comportement n'apparaît qu'une seule fois dans l'essai 5 (session 2) ,puis 3 fois dans l'essai suivant pour devenir majoritaire dans le dernier essai de la session (13 fois). Dès la troisième session, ce sujet est donc capable de produire des décalages situés sur les deux points de revirements. Leur stabilité est obtenue pour l'un par paramétrisation (passage du 305° au 340°) et pour l'autre par émergence progressive.

Dès le premier essai de la deuxième session, le sujet force deux fois sur certains cycles qu'il enchaîne directement avec une coordination stable (305° ou 340°). A partir du cinquième essai, il arrive à reproduire cette coordination complexe plusieurs fois de suite mais il repart à chaque fois sur ses coordinations spontanées. De plus, lors des premiers essais de la session2, quand le sujet force deux fois dans le cycle, il le fait à différents moments (forçage à 140°/305° ou à 180°/305° ou encore à 180°/340°) dénotant une faible stabilité de ces types de comportement. Par la suite, il se stabilise à 180°/340° de façon simultanée à la stabilisation du 180° qui devient plus fréquent que le 340°. Ceci pourrait être du au fait que le sujet cherche à bien maîtriser ce moment de forçage et qu'il ait donc besoin pour le stabiliser de ne forcer sur certains cycles qu'à cet endroit.

Lors de la 3^{ème} session, le sujet se stabilise sur les points de revirement avant (180°) et arrière (340°) tant sur les coordinations en 1/1 (forçage à 180° ou à 340°)

qu'en 2/1 (forçage à 180° et à 360°). Les coordinations spontanées peuvent donc s'envisager comme une aide à l'instauration du comportement expert, puisque c'est grâce à celles-ci que le sujet se stabilise sur les points de revirements, lui permettant par la suite de produire des coordinations en 2/1. Cependant, on observe toujours une alternance entre des coordinations de type 2/1 et 1/1, et ce, jusqu'à la fin de l'expérimentation, où ces comportements complexes deviennent presque aussi fréquents que les coordinations simples.

Le sujet semble avoir besoin d'un peu de temps au début de chaque essai pour pouvoir forcer deux fois le système par cycle, ce qui pourrait correspondre au temps nécessaire pour acquérir une amplitude minimale permettant ce double forçage. Par la suite cette alternance entre le mode de coordination simple (1/1) et le mode plus complexe (2/1) montre bien dans un premier temps que les réorganisations qualitatives du comportement ne se font pas de manière abrupte. Ici le sujet évolue en adoptant de nouveaux comportements qui vont petit à petit évincer les comportements initiaux. On se retrouve dans des configurations où coexistent des comportements en cours de déstabilisation et des comportements émergents, ce qui pourrait correspondre à la phase de bi-stabilité décrite par Delignières *et al.* (soumis).

Cependant, le fait qu'après cinquante essais le sujet stagne toujours dans cette zone d'oscillation entre coordination débutante et confirmée nous amène à penser que le sujet était encore en cours d'apprentissage, puisque si nous restons dans l'hypothèse de la bifurcation nœud-col émise par Delignières *et al.* (soumis) sur simulateur de ski, le sujet devrait ensuite s'acheminer vers une phase monostable où il ne produirait plus que des coordinations de type 2/1. Les résultats obtenus lors du post-test nous montrent d'ailleurs que le sujet, même s'il est de nouveau capable de produire du 2/1, revient parfois sur un comportement qu'il avait au départ (305°), donnant l'impression d'être revenu au niveau acquis à la 4^{ème} session.

Cette remarque pose la question de la validité de la mesure de l'amplitude comme critère d'évaluation de l'apprentissage, remarque déjà avancée par Nourrit (2002) sur le simulateur de ski où la coordination débutante permettait aux sujets d'osciller à même amplitude que les experts. Dans notre étude, les gains en amplitude se font principalement lors des premières sessions où les sujets ont encore un comportement débutant. Cependant, aucun sujet ne parvient à osciller avec autant

d'amplitude que le sujet 1. De plus, le sujet 5 qui parfois se place sur une coordination en 2/1 ($180^\circ/305^\circ$ ou $140^\circ/305^\circ$) est celui qui obtient la plus faible amplitude. Il semblerait donc qu'il faille nuancer l'intérêt de cette mesure dans le sens où elle ne donne d'information que sur le résultat sans permettre d'en déduire de quelconques évolutions qualitatives du comportement.

L'évolution quasi linéaire de l'amplitude contraste d'ailleurs avec les changements cycle à cycle de comportement. Cette instabilité des comportements vue chez tous les sujets s'explique par la difficulté qu'ont les sujets à maîtriser leur équilibre sur cette balançoire ajouté à leur volonté d'explorer le système pour parvenir à des oscillations fluides. Les sujets cherchent donc à sortir de ce qu'ils savent faire pour être plus performant, mais l'instabilité du système face à ce comportement les ramène constamment vers une coordination mieux maîtrisée. De plus le moindre déséquilibre, qu'il soit provoqué par un frottement ou une inattention, entraîne le système vers une coordination stable qui permettra au sujet de se restabiliser tout en continuant à osciller. Cela pose le problème du temps imparti pour chaque essai, à savoir que le sujet n'a peut-être pas suffisamment de temps pour revenir sur cette nouvelle coordination et tenter de la stabiliser. Il serait donc intéressant de tester si en augmentant la durée des essais, les sujets parviennent vraiment à stabiliser leur nouvelle coordination de façon à se retrouver dans une phase monostable qui caractériserait l'apprentissage réel d'un comportement.

Seul le sujet 6 parvient à cette phase de monostabilité. Cependant, celle-ci n'est acquise que par renforcement d'une coordination présente dès le début (le340, rappelant l'apprentissage en coopération décrit par Zanone et Kelso (1997) . On peut se demander si le sujet n'a pas cherché à obtenir une stabilité maximale sur un moment de forçage, qui lui aurait permis par la suite d'aller explorer d'autres types de coordinations (notamment le 2/1), comme l'ont fait les autres sujets si l'expérience avait été poursuivie. De même il aurait été intéressant de voir l'évolution du comportement du sujet 2, qui lors de la dernière session change totalement de comportement en allant explorer les moments de forçage situés aux alentours du point de revirement avant (140° et 180°) alors qu'il optait pour un décalage de phase de 305° lors de la session précédente. Ce changement paraît très abrupt et renvoie certainement à une volonté d'exploration de l'espace de travail tel que le définit Newell (1991). Il aurait fallu une

session supplémentaire pour voir si ce changement était effectivement bien une exploration et non une transition abrupte. Néanmoins, cette dernière proposition ne peut être validée car s'il s'était agi d'une transition de phase, le sujet aurait du rester sur ce nouveau comportement lors du post-test. Or le sujet revient aux coordinations adoptées auparavant.

Tous ces résultats nous amènent à penser que l'apprentissage d'habiletés complexes ne peut se résumer à l'émergence et à l'évolution de coordinations spontanées similaires pour tous. La variabilité inter-sujet met en avant la spécificité de chacun lorsqu'on met en jeu un grand nombre de degré de liberté. Cependant, il est possible d'en dégager des principes communs qui aident à la compréhension du processus d'apprentissage qui dans cette expérience ne semble pas comporter de transition abrupte mais des substitutions lentes entre les coordinations débutantes et confirmées .

5. Conclusion

L'expérimentation que nous avons réalisé avait pour but de mettre en évidence l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'oscillations sur balançoire. Nous nous sommes tout d'abord intéressés à la coordination entre les oscillations de la plateforme et les actions de forçage opérées par le sujet, puis à l'évolution des angles corporels au niveau de l'articulation de la hanche et du genou.

Trois principaux résultats peuvent être retenus de ce travail :

- Contrairement à un ensemble de travaux réalisés précédemment sur l'acquisition des habiletés complexes (Temprado *et al.*,1997 ; Caillou et al., sous presse ; Delignières et al., 1998 , 1999 ; Nourrit et al., 2000 , soumis), la présente expérimentation suggère que de profondes différences interindividuelles puissent apparaître dans les coordinations spontanément adoptées par les débutants.

- D'une manière générale, l'évolution des coordinations avec l'apprentissage n'apparaît pas brutale, mais plutôt comme la substitution progressive d'une coordination « débrouillée » à la coordination débutante, au cours d'une phase de transition au cours de laquelle les deux modes de forçage sont exploités en alternance (Nourrit et al., soumis).

- La coordination débutante et la coordination débrouillée qui lui succède semblent davantage entretenir des rapports de coopération que d'opposition : la première est souvent légèrement modifiée (de manière paramétrique) pour faciliter l'émergence de la seconde, et au cours de la période où les deux coordinations sont exploitées en alternance, la première semble servir de refuge, permettant l'exploration transitoire de la nouvelle coordination.

Ces trois propositions confirment certains des résultats antérieurs, mais permettent également de jeter un regard nouveau sur la dynamique de l'acquisition des habiletés complexes. Cette expérimentation n'a cependant pas eu une durée assez longue pour conclure de manière définitive sur les caractéristiques de l'installation finale du comportement expert. Ces trois propositions tracent les axes futurs des recherches que nous pouvons envisager dans ce domaine.

Références bibliographiques

- Beek, P.J., Peper, C.E. & van Wieringen, P.C.W. (1992). Frequency locking, frequency modulation, and bifurcations in dynamic movement systems. In G.E. Stelmach & J.Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior II* (pp.599-622). Amsterdam : Elsevier Science Publishers.
- Bernstein, N.A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford : Pergamon Press.
- Caillou, N., Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B. & Delignieres, D. (sous presse). Overcoming spontaneous patterns of coordination during the acquisition of a complex balancing task *Canadian Journal of Experimental Psychology*.
- Crossman, E.R.F.W. (1959). A theory of the acquisition of speed-skill. *Ergonomics*, 2, 153-166.
- Delignières, D., Nourrit, D. Deschamps, T., Lauriot, B., & Caillou, N. (1999). Effects of practise and tasks constraints on stiffness and friction functions in biological movements. *Human Movement Science*, 18, 769-793.
- Delignières, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M. & Micaléff, J-P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17, 221-241.
- Durand, M., Geoffroi, V., Varray, A. & Prefaut, C. (1994). Study of the energy correlates in the learning of a complex self-paced cyclical skill. *Human Movement Science*, 13, 785-799.
- Mottet, D., & Bootsma, R.J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80,235-245.
- Newell, K.M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual Review of Psychology*, 42, 213-237.
- Newell, K.M., & McDonald, P.V. (1995). Learning to coordinate redundant biomechanical degrees of freedom. In: S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion and P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical and cognitive constraints* (pp. 515-536). New York: Academic Press.

- Nourrit, D., Delignières, D., Caillou, N., Deschamps, T. & Lauriot, B. (en révision). On discontinuities in motor learning: A longitudinal study of complex skill acquisition on a ski-simulator. *Journal of Motor Behavior*.
- Nourrit, D. Lauriot, B., Deschamps, T., Caillou, N., & Delignières, D. (2000). The effects of required amplitude and practice on frequency stability and efficiency in a cyclical task. *Journal of Sport Sciences*, *18*, 1-12.
- Nourrit, D. (2000). *Etude de l'évolution des coordinations dans l'acquisition des habiletés complexes*. Thèse de doctorat S.T.A.P.S, Université de Montpellier I.
- Temprado, J.J., Della-Graza, M., Farrell, M. & Laurent, M. (1997). A novice - expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volley-ball serve. *Human Movement Science*, *16*, 653-676.
- Vereijken, B. (1991). *The dynamics of skill acquisition*. Amsterdam : Free University of Amsterdam.
- Vereijken, B., van Emmerik, R.E.A., Bongardt, R., Beek, W.J. & Newell, K.M. (1997). Changing coordinative structures in complex skill learning acquisition. *Human Movement Science*, *16*, 823-844.
- 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.
- Winter, D.A. (1990). *Biomechanics of motor control and Human Movement*. (2nd Ed.). New-York : Wiley.
- 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.
- Zanone, P.G., & Kelso, J.A.S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 1454-1480.