

**UNIVERSITE DE MONTPELLIER 1**  
**U.F.R. S.T.A.P.S**

**THESE**

En vue de l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER I**

ECOLE DOCTORALE : SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

Présentée par

**Caroline TEULIER**

**NATURE DES TRANSITIONS DANS L'EVOLUTION DES COORDINATIONS  
LORS DE L'APPRENTISSAGE D'HABILETES COMPLEXES**

Soutenue le 9 décembre 2005 devant le jury composé de :

|                       |                                 |                    |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------|
| Didier DELIGNIERES    | PU, Université Montpellier I    | Directeur de thèse |
| Bernard THON          | PU, Université Toulouse III     | Rapporteur         |
| Yannick BLANDIN       | PU, Université Poitiers         | Rapporteur         |
| Marielle CADOPI       | PU, Université Montpellier I    | Examineur          |
| Jean-Jacques TEMPRADO | PU, Université Aix-Marseille II | Examineur          |
| Pier-Giorgio ZANONE   | PU, Université Toulouse III     | Examineur          |

*A mon grand-père et à ma petite sœur,  
Et à ceux qui entre temps ont construit ma vie,*

## *Remerciements*

Mes premiers remerciements iront à Didier Delignières qui a accepté la lourde tâche de m'encadrer pendant cinq années. Son soutien et ses connaissances m'ont permis de progresser scientifiquement. Sa confiance et son humanité m'ont permis d'évoluer à mon rythme, de trouver ma place dans une « recherche » pas toujours évidente. Le tout a permis à ce projet d'être mené à terme...encore une fois *Merçi*.

Je tiens aussi à remercier les professeurs Bernard Thon et Yannick Blandin qui ont accepté de donner de leur temps pour rapporter ce travail, ainsi que les membres du jury, les professeurs Jean-Jacques Temprado et Pier-Giorgio Zanone. J'adresse un merci tout particulier au professeur Marielle Cadopi, qui en plus d'être examinateur de ce travail, a été mon examinateur de conscience et de cœur pendant ces années passées à Montpellier.

Cependant, ce travail n'aurait pu voir le jour sans la participation *totalemt volontaire et spontanée* de nombreuses personnes ayant sacrifiées de nombreuses soirées afin de garder une forme olympique tout au long des expériences...Il y aurait une certaine redondance à dire que je remercie les gens du laboratoire EDM (ou SPS pour les plus anciens !)...car rares sont ceux qui ont échappé à mes protocoles...

Et si vous trouvez des fautes dans ce travail, veuillez vous adresser à mes correcteurs quasi automatiques personnels de haute qualité (Anne, Yo, Tom, Guillaume, Martine, François), avec un prix spécial rigueur et longévité pour M<sup>elle</sup> Sylvaine.

Enfin, il y a ceux qui d'une façon « détournée » ont permis à ce travail d'avancer plus vite, en le laissant reposer par moment ! Très sincèrement, je voudrais remercier mes amis qui m'ont rappelé à la réalité de la vie, quand on peut si vite s'enfermer dans son microcosme. Anne et Belle, mes colloqs d'infortune, Steph, Elise, Gégé, Jeannie, YoYo et Sylvaine, les randonneurs et skieurs...merci de m'avoir donné tant d'oxygène. Une forte pensée pour Steph Gidel, exemple de vie à mon sens, qui malgré la traversée d'états on ne peut plus instables, arrive à garder un optimisme ultra contagieux, qui en un week-end vous redonne un moral d'acier.

Pour finir, je voudrais dire un grand merci à toute ma famille, qui m'a soutenue à mille à l'heure dans cette aventure (et dans tant d'autres). Malgré les périodes chaotiques traversées, je tiens à dire à mes parents que sans eux, sans leur amour, sans leur soutien, je n'écrirais pas ces quelques mots...Enfin un grand merci à mes soeurs Delph, et Mathou, ainsi qu'à Ced, qui même loin veillent sur moi.

## *Sommaire*

|  |    |
|--|----|
| <i>Introduction</i> .....  | 1  |
| <i>Chapitre I : Cadre théorique</i> .....                                      | 10 |
| 1. <i>Auto-organisation et Coordinations Motrices</i> .....                    | 10 |
| 1.1 Théorie de l'auto-organisation .....                                       | 10 |
| 1.1.1 Systèmes complexes .....   | 10 |
| 1.1.2 Emergence de formes .....  | 11 |
| 1.1.3 Transition de phase .....  | 13 |
| 1.1.4 Importance de la non-linéarité : .....                                   | 15 |
| 1.2 Auto-organisation et coordination motrice .....                            | 17 |
| 1.2.1 Principes d'auto-organisation appliqués aux coordinations motrices ..... | 17 |
| 1.2.2 Les contraintes .....  | 18 |
| 1.2.3 Formation de patrons .....   | 20 |
| 1.2.4 Propriétés des patrons de coordination préférentiels .....               | 21 |
| 1.2.4.1 La stabilité .....   | 21 |
| 1.2.4.2 Attraction et propriétés d'inaccessibilité .....                       | 22 |
| 1.2.5 Les transitions de phase .....   | 23 |
| 1.2.5.1 Concepts issus des systèmes dynamiques non-linéaires .....             | 23 |
| 1.2.5.2 Changement spontané .....  | 24 |
| 1.2.5.3 Changement intentionnel .....  | 29 |
| 2. <i>Apprentissage moteur et dynamique des coordinations</i> .....            | 32 |
| 2.1 Définition de l'apprentissage moteur selon l'approche dynamique .....      | 32 |
| 2.1.1 La coordination au centre de l'apprentissage .....                       | 32 |
| 2.1.2 Apprentissage et discontinuité .....                                     | 36 |
| 2.2 Recherche de la solution optimale .....                                    | 37 |
| 2.2.1 Les coordinations spontanées .....                                       | 38 |
| 2.2.2 Navigation dans l'espace de travail perceptivo-moteur .....              | 39 |
| 2.3 Nature du chemin d'accès .....   | 42 |
| 2.3.1 Situation de convergence .....   | 42 |
| 2.3.2 Situation de compétition .....   | 44 |
| <i>Chapitre II : Nature de la transition du mouvement résultant</i> .....      | 51 |
| <i>Expérience 1</i> .....  | 51 |
| 1. <i>Introduction</i> .....   | 51 |
| 2. <i>Méthode</i> .....  | 55 |
| 2.1 Participants .....   | 55 |
| 2.2 Tâche expérimentale .....  | 55 |
| 2.3 Procédure .....  | 56 |
| 2.4 Modélisation .....   | 57 |
| 2.5 Données physiologiques .....   | 59 |
| 3. <i>Résultats</i> .....  | 60 |
| 3.1 Amplitude .....  | 60 |
| 3.2 Fréquence .....  | 61 |
| 3.3 Coefficients de raideur .....  | 62 |
| 3.4 Fonction d'amortissement .....   | 63 |
| 3.5 Coût du mouvement .....  | 64 |
| 4. <i>Discussion</i> .....   | 65 |

|   |     |
|---|-----|
| <i>Chapitre III : Nature de la transition au niveau des coordinations</i> ..... | 71  |
| <i>Expérience 2</i> .....   | 71  |
| 1. <i>Introduction</i> .....  | 71  |
| 2. <i>Méthode</i> .....   | 75  |
| 2.1 Participants .....  | 75  |
| 2.2 Protocole Expérimental .....  | 75  |
| 2.3 Recueil des données.....  | 76  |
| 2.4 Analyse des données.....  | 76  |
| 2.4.1 Variables de performance .....  | 76  |
| 2.4.2 Phase Relative.....   | 77  |
| 2.5 Représentation graphique .....  | 77  |
| 2.5.1.1 Consistance .....   | 79  |
| 2.6 Analyses Statistiques .....   | 80  |
| 3. <i>Résultats</i> .....   | 81  |
| 3.1 Variables de performances .....   | 81  |
| 3.1.1 Evolution de l'amplitude.....   | 81  |
| 3.1.2 Evolution de la fréquence .....   | 81  |
| 3.1.3 Evolution de la fluidité .....  | 82  |
| 3.2 Evolution des modes de coordination.....                                    | 82  |
| 3.2.1 Evolution des forçages.....   | 82  |
| 3.2.2 Evolution de la consistance.....  | 83  |
| 4. <i>Discussion</i> .....  | 84  |
| <i>Expérience 3</i> .....   | 91  |
| 1. <i>Introduction</i> .....  | 91  |
| 2. <i>Méthode</i> .....   | 93  |
| 2.1 Participants .....  | 93  |
| 2.2 Protocole Expérimental .....  | 93  |
| 2.3 Recueil des données.....  | 94  |
| 2.4 Analyse des données.....  | 94  |
| 2.4.1 Variables de performance .....  | 95  |
| 2.4.2 Phase Relative.....   | 95  |
| 3. <i>Résultats</i> .....   | 95  |
| 3.1 Evolution de l'amplitude des balancers .....                                | 95  |
| 3.2 Evolution des modes de coordination.....                                    | 96  |
| 3.2.1 Schématisation des comportements observés .....                           | 98  |
| 3.2.2 Catégorisation des forçages utilisés .....                                | 99  |
| 4. <i>Discussion</i> .....  | 101 |
| <i>Chapitre IV : Contraintes et nature de la transition</i> .....               | 104 |
| <i>Expérience4</i> .....  | 104 |
| 1. <i>Introduction</i> .....  | 104 |
| 2. <i>Méthode</i> .....   | 108 |
| 2.1 Participants .....  | 108 |
| 2.2 Protocole Expérimental .....  | 108 |
| 2.3 Recueil des données.....  | 109 |
| 2.4 Analyse des données.....  | 110 |
| 2.4.1 Variables de performance .....  | 110 |
| 2.4.2 Phase Relative.....   | 110 |
| 2.5 Analyse statistique .....   | 111 |

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.    | <i>Résultats</i> .....   | 112 |
| 3.1   | Variables quantitatives .....  | 112 |
| 3.2   | Evolution des modes de coordination.....   | 112 |
| 3.2.1 | Evolution des stratégies de forçage.....   | 112 |
| 3.2.2 | Evolution des associations de forçages.....  | 114 |
| 4.    | <i>Discussion</i> .....  | 117 |
|       | <i>Discussion générale</i> .....   | 120 |
| 1.    | <i>L'apprentissage à travers une bifurcation saddle-node</i> .....                   | 121 |
| 1.1   | caractéristiques essentielles (les invariants).....                                  | 121 |
| 1.2   | Variations de la transition.....   | 123 |
| 1.2.1 | Au niveau des échelles de temps .....  | 123 |
| 1.2.2 | Du niveau d'observation .....  | 123 |
| 2.    | <i>Nature du lien entre coordinations spontanées et coordinations expertes</i> ..... | 124 |
| 3.    | <i>Influence des contraintes sur les coordinations spontanées</i> .....              | 125 |
| 3.1   | Homogénéité des coordinations spontanées .....                                       | 125 |
| 3.2   | Optimalité des contraintes de la tâche .....   | 127 |
| 4.    | <i>Conclusion</i> .....  | 127 |

## *Introduction*

Marcher, courir, sauter, ouvrir une porte...sous une apparente simplicité de réalisation, ces actions sont la résultante d'un système extrêmement complexe, constitué d'un grand nombre de paramètres que l'homme a appris à gérer afin d'atteindre le but recherché.

Dès lors que l'on s'intéresse au comportement moteur, la question de la manière dont l'individu gère cette complexité devient fondamentale. Et si l'on s'intéresse à l'apprentissage moteur, c'est la question de la genèse de la coordination et de son évolution qui devient centrale, car c'est elle qui permettra l'atteinte du but recherché. Apprendre à marcher n'est pas une fin en soi, mais l'apprentissage de la marche passe avant tout par l'élaboration du patron de marche qui va permettre par exemple de se déplacer avec un objet.

Ces coordinations ont donc été apprises. Cependant, et c'est la question sur laquelle se centrera ce travail, l'état actuel des recherches laisse des zones d'ombre quant à la manière dont elles sont acquises. Il est avant tout nécessaire de clarifier les différents concepts qui entrent en jeu dans la compréhension de ce processus, et de voir l'impact qu'ils peuvent avoir sur celle-ci.

« Il y a apprentissage lorsqu'un organisme placé plusieurs fois dans la même situation, modifie sa conduite de façon systématique et durable » (Reuchlin, 1977). Cette définition, bien que portant sur le produit de l'apprentissage, illustre parfaitement les voies de recherche adoptées au cours des trente dernières années. En effet, elle stipule clairement qu'une évolution de la « conduite » du débutant vers la « conduite » de l'expert, est synonyme d'apprentissage, sous réserve que cette modification perdure dans le temps.

L'apprentissage n'étant pas un processus directement observable, les chercheurs l'ont inféré à l'aide de divers tests (Lee, 1998) : des comparaisons pré-tests/ post-tests, permettant d'évaluer la différence entre le comportement initial et le comportement final, et des tests de rétention ou de transfert, servant à mesurer la durabilité et l'adaptabilité du comportement final. Le problème de ces tests est qu'ils sont tournés essentiellement voire exclusivement sur la performance, c'est-à-dire sur le produit de la coordination produite, en termes de pourcentages ou scores de réussite (Lavery, 1962; Pollack & Lee, 1992), de temps de mouvement ou temps de réaction (Crossman, 1959; Schneider & Shiffrin, 1977;

Shea & Morgan, 1979) ou encore de score d'erreur (Catalano & Kleiner, 1984; Pew, 1974; Shea, Wulf, Park, & Gaunt, 2001; Winstein & Schmidt, 1990). Or depuis les travaux de Bernstein (1967), il est établi qu'un même résultat peut être reproduit par des trajectoires articulaires différentes, appelées variables d'exécution. Müller et Sternad (2004) montrent que différentes combinaisons des variables d'exécution (e.g. configuration articulaire, position, angle et vitesse à laquelle la balle est lâchée) peuvent donner lieu à un résultat identique (quille renversée). Ces variables dépendantes quantitatives centrées uniquement sur la performance semblent donc insuffisantes pour rendre compte des changements de comportement lors de l'apprentissage.

Or quelles que soient les approches théoriques, toutes s'accordent à dire que l'apprentissage est un processus, c'est-à-dire un ensemble de phénomènes dynamiques dont on peut suivre l'évolution et les étapes ou états successifs (Thines & Lempereur, 1975). Le regard univoque porté sur la performance ne peut donc répondre aux questions sur la nature de l'apprentissage. Il semble alors incontournable de s'orienter vers une étude simultanée de la performance et des coordinations, sous-jacentes à la production de la performance.

Une autre critique que l'on peut adresser à la plupart des études classiques sur l'apprentissage est de s'être intéressées à l'évolution de la performance moyenne, mesurée dans un groupe de sujets, masquant ainsi les différences interindividuelles. Newell (1991) estime ainsi que les résultats généralement admis (et notamment la fameuse *loi puissance*, décrivant l'apprentissage comme un processus continu, uniformément décéléré), pourrait ne constituer qu'un artéfact lié à l'occultation des différences interindividuelles.

Ceci soulève un autre point extrêmement important : si l'on veut comprendre l'apprentissage, il faut l'appréhender dans son acception dynamique (i.e. en terme d'évolution dans le temps). Or bon nombre d'approches ne l'ont étudié qu'au travers de comparaisons d'états, telles que la comparaison experts/novices ou pré-test/post-test. Si cette démarche semble peu pertinente, elle constitue néanmoins le standard de la plupart des expérimentations réalisées, même si de nouvelles approches commencent à s'orienter naturellement vers l'analyse de séries temporelles permettant la mise en évidence de la logique de construction progressive de l'habileté (Spray & Newell, 1986).

D'une manière générale, l'analyse de la littérature suggère qu'une place préminente a été donnée au produit de l'apprentissage, laissant de côté pendant des années la question de sa nature. Or cette question est essentielle pour tenter de comprendre comment fonctionne la motricité, dans le sens où elle représente un test puissant pour examiner le pouvoir exploratoire des différentes théories du contrôle moteur (Glencross, Whiting, & Abernethy, 1994). Au niveau empirique, cette question de la nature de l'apprentissage permettrait de comprendre le lien tissé entre le comportement débutant et le comportement expert, et ainsi d'orienter les interventions pédagogiques. Explorer la nature de l'apprentissage reviendrait à s'intéresser à ce que Thompson (1961) appelle la *cause physique* d'un phénomène, sans en négliger la *cause finale*. Par exemple, dire que la terre est ronde parce que tout fluide en rotation se concentre en une forme sphérique sous l'action de sa propre gravité, revient à expliquer la *cause physique* de la forme (Gleick, 1989). En revanche dire qu'une roue est ronde parce que cette forme permet le transport revient à expliquer la *cause finale* de la forme. S'intéresser au produit de l'apprentissage reviendrait donc à s'interroger uniquement à la *cause finale* : l'homme apprend pour atteindre un but, et renouveler cette atteinte. Toutes les sciences où la pensée darwinienne a pris de l'importance ont orienté leur réflexion vers cette *cause finale*. Le champ de l'apprentissage moteur s'est longtemps inscrit dans cette pensée avec les courants behavioriste (e.g. le réflexe de Pavlov) et cognitiviste (e.g. la métaphore computationnelle), tournés vers la mesure de la performance.

Il est donc logique de voir que la majorité des études réalisées ont porté sur la finalité de l'apprentissage, c'est-à-dire l'atteinte la plus rapide du comportement expert. De ce fait, les travaux de recherche se sont souvent focalisés sur les conditions d'apprentissage, c'est à dire sur les facteurs susceptibles de l'accélérer ou d'en améliorer l'adaptabilité. Tout un pan de la littérature sur l'apprentissage a été consacré à ces facteurs, que ce soit sur le rôle des feed-back (Lai & Shea, 1998; Swinnen, Lee, Verschueren, Serrien, & Bogaerds, 1997; Weeks & Kordus, 1998; Wulf, Horger, & Shea, 1999; Wulf, Lee, & Schmidt, 1994; Wulf, Shea, & Matschiner, 1998), sur la variabilité des conditions d'apprentissage (Catalano & Kleiner, 1984; Hautala & Kidd, 1990; Kerr & Booth, 1978; Lai & Shea, 1998; Whitacre & Shea, 2000) sur l'interférence contextuelle (Carnahan, Van Eerd, & Allard, 1990; Del Rey, Wolgalter, & Carnes, 1987; Gabriele, Hall, & Buckholz, 1987; Lee & Magill, 1983; Shea & Morgan, 1979) ou sur le rôle des informations données

avant la pratique (Carroll & Bandura, 1982; Green & Flowers, 1991; Hodges & Franks, 2002; Mayer, 1999; Reber, 1989). Dans ces axes de travail, les chercheurs ont essayé de répondre à la question du « comment enseigner », à savoir quelles stratégies utiliser pour obtenir une habileté finale la plus efficace et adaptable possible. La question du « qu'est-ce qui est appris » est ici souvent laissée en suspens. Or comme nous l'avons déjà dit, il semble primordial de répondre à cette question, de savoir comment la coordination évolue pour devenir ce qui est appelé une habileté motrice, caractérisée « par une capacité [...] à élaborer et à réaliser une réponse efficace et économique pour atteindre un objectif précis » (Durand & Barna, 1987). Cette question sur ce qui est appris renvoie donc aussi à la question du « qu'est-ce qu'apprendre ». Questions qui commencent à trouver des réponses depuis l'initiation d'une nouvelle génération de travaux, caractérisés par un intérêt majeur pour la coordination elle-même et son évolution au cours de la pratique (Swinnen & Walter, 1988; Vereijken, 1991; Walter & Swinnen, 1990; Zanone & Kelso, 1992). Cependant, ces études comportent bien souvent des instructions et feed-back divers, ce qui ne permet pas d'observer la nature même du processus. Il semble important d'identifier le processus d'apprentissage dans des conditions minimalistes d'environnement humain et/ou matériel, afin de mieux isoler son fonctionnement basal.

Afin d'essayer d'identifier les variables fondamentales qui pouvaient évoluer lors de l'apprentissage, de nombreux chercheurs se sont penchés sur des études comparatives entre novices et experts (Abernethy, 1987; Abernethy & Russell, 1987; Chase & Simon, 1973; Delignières et al., 1998; Temprado, Della-Grasta, Farrell, & Laurent, 1997). Cette approche, supposée contraster les étapes ultimes du processus d'apprentissage, est en effet susceptible de révéler les évolutions qui l'ont marqué. Mais comme nous l'avons évoqué précédemment, une telle démarche ne renseigne en rien sur la manière dont l'apprentissage s'est déroulé. L'étude de la coordination experte est cependant loin d'être dépourvue d'intérêt, révélant les caractéristiques du comportement visé par l'apprentissage (ou le guidant). Une première caractéristique souvent retenue est celle de l'efficacité, définie par Leplat (1989) comme le fait d'atteindre à moindre coût le même niveau d'efficacité. Il s'agit donc du rapport entre ressources investies et performance obtenue, qui corrobore parfaitement avec la définition de l'habileté motrice proposée par Durand. Il faut cependant faire la distinction entre les différents types de ressources qui peuvent être d'ordre physiologique ou psychologique. L'efficacité énergétique physiologique,

mesurable à l'aide notamment de la consommation d'oxygène, est une caractéristique majeure de la motricité habile (Brisswalter, 1994; Holt, Jeng, Ratcliffe, & Hamill, 1995; Sparrow, Hugues, Russell, & Le Rossignol, 1999; Sparrow & Irizarry-Lopez, 1987). Par exemple, Hogberg (1952) montre qu'il existe une courbe à optimum entre la longueur de foulée et la consommation d'oxygène pour une vitesse de course donnée. Ceci montre l'existence d'un régime de travail optimum, retrouvé dans divers travaux (Holt, Hamill, & Andres, 1991; Kugler & Turvey, 1987; Salvendy, 1972), régime adopté spontanément par les sujets experts lorsqu'ils ont le libre choix de la coordination de réponse (Holt et al., 1991; Salvendy, 1972; Warren, 1984). Durand, Geoffroi, Varray et Préfaut (1994) mettent en avant que les sujets, au cours de l'apprentissage d'oscillations sur un simulateur de ski, convergent en terme de fréquence vers la fréquence de résonance du simulateur, convergence accompagnée d'une amélioration de l'efficacité énergétique. Ces expériences sont en accord avec les hypothèses émises par Bernstein (1967) et Sparrow (1983) pour qui les étapes ultimes de l'apprentissage seraient caractérisées par l'exploitation maximale des forces passives du système et une optimisation de l'efficacité. De la même manière, l'efficacité cognitive est liée à un régime optimal de travail. L'efficacité cognitive correspond à une optimisation de la charge mentale. Divers travaux ont pu rendre compte de l'économie de l'activité de l'expert, déterminée par un recours aux processus automatiques pour un traitement rapide et sans effort (Abernethy, 1993), ou par l'anticipation perceptive pour une lecture rapide des situations (Ripoll, 1987). De plus, certains auteurs (Monno, Chardenon, Temprado, Zanone, & Laurent, 2000; Zanone, Monno, Temprado, & Laurent, 2001) démontrent, grâce à l'utilisation du paradigme de la double tâche pendant une tâche de coordination bimanuelle, que le temps de réaction qui permet d'évaluer le coût attentionnel et/ou intentionnel demandé par la tâche, est plus court pour une certaine fréquence de mouvement. La relation entre fréquence de mouvement et temps de réaction forme, comme pour la consommation d'oxygène dans les expériences citées précédemment, une courbe à tendance quadratique (i.e. courbe en « U »). Ceci traduit bien un maximum d'efficacité cognitive, pour un régime de travail optimal. Enfin, cette expérience a permis de mettre en relation efficacité cognitive et stabilité de la coordination. Cette stabilité de la coordination est la troisième caractéristique fondamentale du comportement expert, autrement dit du comportement optimal (Kelso, 1995; Kelso, Ding, & Schöner, 1993; Schöner & Kelso, 1988a). De nombreux travaux ont

en effet mis en avant que dans des conditions environnementales stables, l'expert tend à reproduire avec une grande consistance les aspects cinématiques de son comportement (Higgins & Spaeth, 1972; Nourrit, Caillou, Deschamps, Lauriot, & Delignieres, 1999; Viviani & Terzuolo, 1980). La relation entre la stabilité et l'efficacité énergétique a été mise en avant par des travaux comme ceux de Holt et al. (1995) et de Candau et al. (1998), montrant que le comportement optimal était bien caractérisé par ces deux facteurs.

Cette analyse de l'expertise motrice montre clairement combien il est important pour comprendre le processus d'apprentissage de s'intéresser à la coordination en elle-même. Mais s'intéresser à celle-ci nécessite l'utilisation d'outils d'analyse du mouvement, ainsi que l'identification de variables pertinentes permettant de la décrire à un niveau macroscopique. L'émergence de nouvelles technologies d'analyse du mouvement en plusieurs dimensions, couplée à l'apparition dans le champ du contrôle et de l'apprentissage moteur des méthodes d'analyses des systèmes dynamiques non linéaires, a permis de jeter un nouveau regard sur l'analyse des coordinations motrices, donnant naissance à une nouvelle approche dite dynamique des coordinations motrices. Cette approche a pour intérêt majeur de proposer des outils mathématiques permettant de capturer la coordination et ses changements dans le temps à l'aide d'un très petit nombre de variables. Elle offre donc un cadre qui se prête parfaitement à l'étude de la question du « qu'est-ce qui est appris », et permet de répondre aussi à la question du « comment », grâce à la compréhension de la notion d'expertise, caractérisée par l'adoption d'un régime optimal.

Un autre point clé de cette approche est qu'elle offre une compréhension du comportement du débutant. En postulant que le système moteur agit comme un système auto-organisé où la coordination émerge des différentes contraintes liées à l'organisme, à la tâche et à l'environnement (Newell, 1986), cette théorie permet de prédire les modes de coordination qui vont être spontanément adoptés par les débutants. En effet, ces contraintes vont imposer les possibles du mouvement (i.e. les possibilités d'action), mais aussi ses impossibles, déterminant en fait le répertoire des coordinations que le sujet est capable d'adopter lorsqu'il est confronté à la tâche. La réponse produite sera alors considérée comme la plus adaptée vis-à-vis des contraintes imposées. A partir de l'identification de ce répertoire de coordination (ou dynamique intrinsèque) et d'une étude au cours du temps, il devient possible de savoir ce qui va être modifié et de connaître la nature de cette

modification. Ainsi pour Beek (1989), « une fois que les lois et les régularités de l'habileté sont connues, un « cadre de référence » devient disponible pour comprendre comment les changements intervenants dans l'apprentissage peuvent être interprétés ». Dans cette approche, le comportement débutant constitue donc une base connue et nécessaire pour étudier l'apprentissage. Cette prise en considération du comportement novice tranche avec la vision qu'en ont les autres théories de l'apprentissage. En effet, la plupart du temps ce comportement était vu comme négatif, inutile. Il entravait l'accès à la coordination experte et il était nécessaire de lutter contre ce comportement, d'empêcher son apparition. Combien d'entraîneurs de tennis ou de golf n'ont permis aux joueurs de frapper une balle qu'une fois le geste à blanc correctement réalisé ? Cette idée de terrain s'est longtemps retrouvée au niveau théorique, où aucun intérêt n'a été porté à la coordination débutante en elle-même, si ce n'est pour montrer son incapacité à produire une performance correcte. L'approche dynamique remet donc en question certaines visions classiques de l'apprentissage : l'intérêt n'est pas uniquement axé sur la coordination experte vers laquelle le sujet doit tendre pour performer mais aussi sur la coordination débutante qui correspond à la meilleure adaptation possible à la tâche à un instant donné, et sur la façon dont elle va orienter l'apprenant vers la coordination experte stable, caractérisée par l'adoption du régime optimal de travail. A partir de là, la question se porte sur ce que Bernstein (1967) appelait déjà la route de l'apprentissage moteur.

Reste à savoir si cette route est identique pour toutes les tâches, ou si elle varie en fonction de leur nature. La plupart des études portant sur l'apprentissage ont porté sur des tâches dites « simples », peu coûteuses en attention, en énergie, mettant en jeu un nombre réduit de segments corporels. Si la frontière entre tâches « simples » et « complexes » n'est pas évidente à définir, elle est essentielle pour apporter un éclairage aux résultats divergents obtenus sur l'apprentissage. Grâce à cette distinction, Wulf et Shea (2002) parviennent à décoder les effets différenciés des conditions d'apprentissage selon la complexité de la tâche, montrant ainsi que la nature de la tâche influence le processus d'apprentissage. Cependant, les facteurs multiples qui entrent en jeu dans la réalisation d'une tâche rendent difficile la classification entre tâche simple et tâche complexe. Wulf et Shea (2002) estiment néanmoins qu'une tâche peut être considérée comme complexe dès lors (i) qu'elle ne peut être maîtrisée en une seule session de pratique, (ii) qu'elle nécessite

la mise en jeu de multiples degrés de liberté (iii) et enfin qu'elle possède une certaine pertinence écologique.

Ces critères peuvent évidemment être abondamment discutés. La quantité de pratique nécessaire à l'apprentissage d'une tâche « complexe » est difficile à définir, et peut difficilement servir de critère de classification. Tout juste est-il possible de dire que la tâche ne peut autoriser une adaptation spontanée, ou effective au bout de quelques essais. Le problème du nombre de degrés de liberté engagés dans la tâche renvoie par exemple aux tâches de positionnement linéaires d'Adams (1971) considérées comme l'archétype de la tâche simple. Cependant le moindre mouvement segmentaire mobilise une infinité de degrés de liberté, si l'on s'affranchit de la définition articulaire de ces derniers. Et les tâches de coordination bimanuelle, appréhendées comme un modèle de mise en œuvre de système complexe, peuvent paraître bien « simples » par rapport à une habileté gymnique. Cependant, en s'en tenant à une définition articulaire des degrés de liberté, il est envisageable de penser qu'une habileté globale, c'est-à-dire mobilisant l'ensemble du corps (*gross motor skill*), satisfait la définition proposée par les auteurs. Quant à la validité écologique, c'est sans doute le point le plus faible de la définition de Wulf et Shea (2002). Le problème n'est pas d'étudier l'apprentissage de telle ou telle habileté relevant de telle ou telle activité sportive ou professionnelle, mais d'analyser plus largement de quelle façon les individus parviennent à résoudre une certaine catégorie de problème. Un chercheur peut construire une tâche complexe dans le but de valider une hypothèse (nous nous sommes livrés à cet exercice à plusieurs reprises pendant cette thèse), sans pour autant que cette tâche ne renvoie à une quelconque activité connue ou couramment pratiquée.

Malgré ces limites, il semble que cette distinction entre habiletés simples et complexes mérite d'être retenue. Les habiletés complexes ont été en général peu étudiées par les théoriciens de l'apprentissage. S'il est aisé de concevoir la nécessité d'utiliser des tâches simples (pour isoler des phénomènes, les mesurer plus précisément et limiter les biais expérimentaux), il faut aussi constater qu'une théorie portant sur l'apprentissage moteur en général ne peut se baser uniquement sur des résultats obtenus sur des tâches simples, artificielles, unisegmentaires. Une théorie de l'apprentissage moteur ne peut être valide que si elle propose des principes applicables aux tâches complexes, proches de la réalité écologique (Wulf & Shea, 2002). Le positionnement de nos laboratoires dans les

Facultés des Sciences du Sport renforce cette nécessité de rendre compte de la motricité globale, typique de la plupart des activités sportives.

Au vu de ces différentes remarques, il semble nécessaire, si l'on désire s'intéresser au processus de l'apprentissage moteur, (i) de se focaliser sur l'évolution dynamique de ses aspects qualitatifs sans pour autant négliger les aspects quantitatifs, (ii) de promouvoir un apprentissage exploratoire uniquement guidé par le but de la tâche pour ne pas interférer l'évolution du processus, (iii) de se baser sur les coordinations débutantes, (iv) et d'opter pour des tâches complexes. En effet, pour réussir à définir la nature du processus, il est absolument nécessaire de regarder ce qu'il se passe au cours de l'apprentissage, de caractériser la transition entre les comportements débutants et experts, et d'en dégager des principes de fonctionnement.

Dans ce cadre, l'approche dynamique semble la plus à même de répondre à ces différents critères, tant pour les outils méthodologiques qu'elle apporte que pour sa conception théorique du comportement moteur. Nous nous attacherons donc à expliquer les principes d'auto-organisation qui sont au centre de cette théorie, puis nous verrons l'état actuel des connaissances sur le processus d'apprentissage, et les questions que cela soulève quant à la compréhension de ce phénomène.

## *Chapitre I : Cadre théorique*

### **1. Auto-organisation et Coordinations Motrices**

#### 1.1 Théorie de l'auto-organisation

Les théories de l'auto-organisation, issues notamment des sciences physiques et chimiques (Haken, 1983, 1984; Nicolis & Prigogine, 1989) reposent sur l'idée que tout système composé d'une multitude d'éléments interagissant les uns avec les autres, qu'il soit de nature physique, chimique ou biologique, peut montrer spontanément, à un niveau macroscopique, des configurations spatio-temporelles organisées et stables (Haken, 1983; Yates, 1987). Ces systèmes peuvent ainsi adopter différentes configurations stables ou formes émergentes, en fonction des contraintes internes et/ou externes qui correspondent à l'ensemble des facteurs qui vont limiter les degrés de liberté du système.

##### 1.1.1 Systèmes complexes

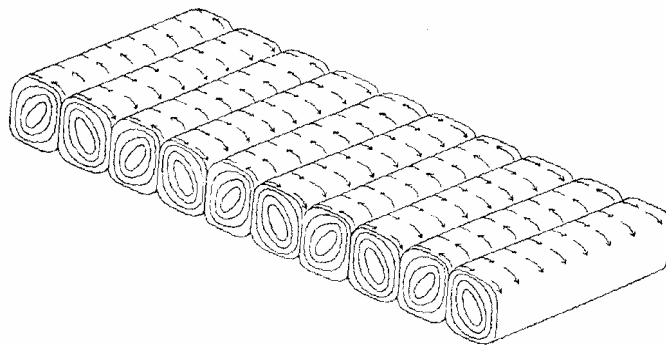
Ce principe s'applique à tous les systèmes complexes, c'est-à-dire composés d'un nombre important d'éléments ou degrés de libertés en interaction. Ces systèmes doivent être ouverts, ce qui signifie qu'ils échangent de l'énergie, de la matière ou de l'entropie en permanence avec l'environnement, et doivent opérer loin de leur état d'équilibre. Ces systèmes sont aussi animés en permanence par des fluctuations inhérentes aux interactions entre les éléments du système eux-mêmes et par leurs interactions avec le milieu extérieur. Le système moteur comme la plupart des systèmes physiques, chimiques et biologiques sont assimilés à de tels systèmes complexes.

L'objectif de cette théorie est donc de comprendre comment ces systèmes peuvent démontrer des comportements organisés et stables en fonction des contraintes qui s'exercent sur eux.

### 1.1.2 Emergence de formes

Avant d'entrer de façon plus exhaustive dans l'étude de l'émergence de formes dans la motricité humaine, ou patrons de coordination, nous allons utiliser l'exemple des rouleaux de Bénard afin d'exposer les principes fondamentaux de l'auto-organisation.

Dans l'expérience de Bénard, un fluide composé de nombreuses molécules est placé dans un récipient clos. Le fluide tend alors vers un état de désordre dans lequel il n'y a aucun mouvement d'ensemble et où la température est similaire à celle de l'environnement. En chauffant doucement le récipient par-dessous, un gradient de température est créé entre le bas et le haut du récipient qui amènera les molécules à des températures différentes en fonction de leur position et fera varier leur densité. La chaleur est alors évacuée par conduction. Le fluide reste dans son état de désordre initial. Quand le gradient de température atteint une valeur critique, une création d'ordre apparaît sous la forme d'un mouvement coordonné de rouleaux observable à l'oeil nu : le fluide se met en mouvement d'une manière non aléatoire, les molécules s'élèvent et se déplacent le long du haut du récipient puis descendent, longent la partie inférieure et remontent (voir Figure 1).



**Figure 1** : Formation des rouleaux, ou cellules de Bénard  
*Source* : d'après Temprado et Montagne (2001), p.87

Ici le système est complexe (le fluide contenant de nombreuses molécules), ouvert car traversé par un gradient d'énergie thermique, et éloigné de son état d'équilibre. Et c'est pour dissiper cette énergie que les molécules vont changer de comportement, permettant au système de retrouver une certaine stabilité. Par contre, la même expérience reproduite dans des conditions identiques, peut aboutir à la formation d'un autre comportement caractérisé par une rotation à sens inverse des rouleaux.

Dans cette expérience, les millions de molécules adoptent spontanément une forme collective stable résultant de la coordination dans le temps et l'espace entre toutes ces molécules. Ici, seules deux formes peuvent émerger de ce système pourtant extrêmement

complexe. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un système auto-organisé va uniquement adopter les configurations spatio-temporelles qui sont les plus stables, c'est-à-dire qui peuvent être maintenues en dépit des fluctuations présentes dans le système et des perturbations diverses qui pourraient l'en faire sortir (Haken, 1983). Si comme ici, pour des conditions initiales similaires le système est capable d'adopter plusieurs formes collectives (différents sens de rotations des rouleaux), alors le système est dit multistable (Haken, 1988).

Un autre principe fondamental du processus d'auto-organisation est que l'ordre spatio-temporel des états se forme sans aucune implication d'une unité externe de contrôle. Ici, le passage d'une forme à une autre répond à la nécessité de dissiper l'énergie créée par les modifications du gradient de température. Aucun « programme » préformé et stocké dans le système n'est requis pour guider l'apparition des différentes formes adoptées. Bien au contraire, ce sont les capacités des éléments du système à se coordonner de façon cohérente et stable qui font que ces formes collectives émergent sans la nécessité d'être explicitement codées ni au niveau des éléments, ni au niveau collectif (Haken, 1988).

La formation de ces états peut donc émerger spontanément lorsque les conditions environnementales évoluent et atteignent une valeur critique (Kelso & Schöner, 1988). Sous l'influence de ces conditions, ou paramètres de contrôle (par exemple, l'évolution du gradient de température dans l'expérience de Bénard), le système génère une structure macroscopique de faible dimension (les rouleaux), exprimant une réduction des degrés de liberté de ce système. Cette « compression » (Haken, 1983), représentée par la dynamique du paramètre d'ordre, rend compte d'une réduction importante de la complexité du système.

Définie en termes de degrés de liberté, c'est-à-dire du nombre d'éléments hétérogènes ou de variables susceptibles de varier indépendamment les uns des autres, cette complexité constitue une des conditions fondamentales pour l'émergence des états ordonnés ou attracteurs (Bonnet, Guiard, Requin, & Semjen, 1994; Haken & Wunderlin, 1990). L'existence de ces derniers permet d'affirmer que la coopération au sein du monde microscopique de forte dimensionnalité (liée au nombre de degrés de liberté) a évolué vers une unité macroscopique complexe dont la description ne dépend plus que d'un petit nombre de paramètres d'ordre (Kay, Saltzman, Kelso, & Schöner, 1987; Prigogine & Stengers, 1992). Dans cette optique, l'important est ce qui est observable au niveau macroscopique, à savoir la formation d'un patron de coordination ou encore « de structure

coordinative » (Kelso, Holt, Kugler, & Turvey, 1980; Turvey, 1977) qui émerge du couplage non-linéaire entre les multiples composants du système.

Cette forme collective (ou patron) exprime donc l'interaction complexe et cohérente des sous-systèmes, et correspond au comportement dynamique macroscopique du système. La réduction de la dimension du système par l'identification d'une ou de peu de variables capables de décrire cette forme collective devient alors essentielle pour comprendre sa formation (Haken, 1983). Ces variables capables de décrire les formes macroscopiques du système sont appelées variables collectives ou paramètres d'ordre (e.g. l'amplitude des rouleaux), et suffisent à décrire les différents états du système. Dans le cas d'un système multistable, la variable collective prend alors différentes valeurs en fonction de la forme initiale dans laquelle le système se trouve. Le concept de variable collective permet donc une réduction du nombre de degrés de liberté puisqu'une seule variable (l'amplitude des rouleaux) suffit à décrire la formation de différentes formes collectives (valeur et variabilité) qu'un système complexe peut exhiber, ainsi que le passage d'un état à un autre.

Tous les éléments du système (ou degrés de liberté) ont été contraints à évoluer conjointement en une seule configuration (un seul degré de liberté) qui organise le comportement de chaque molécule individuellement. Le paramètre d'ordre est donc créé par la coordination entre des parties individuelles du système (ici les molécules). Mais si la(s) variable(s) collective(s) est (sont) dépendante(s) de la coopération entre les sous-systèmes microscopiques, celle(s)-ci est (sont) en retour gouvernée(s) par le comportement macroscopique, défini par la dynamique du paramètre d'ordre. Cette causalité circulaire entre ces deux niveaux d'analyse, microscopique et macroscopique, exprime le principe d'esclavage : tout élément microscopique devient esclave de l'ordre macroscopique qu'il fait émerger. La variabilité du comportement individuel des éléments dans les différents états du système se reflète dans les fluctuations de la variable collective à un niveau macroscopique.

### 1.1.3 Transition de phase

Dans l'exemple des rouleaux de Bénard, c'est un changement critique dans les paramètres du système qui amène l'émergence d'une nouvelle forme à travers la coordination de l'ensemble des composantes du système (Haken, 1983). Le phénomène

observé dans cette expérience est appelé transition de phase d'ordre à ordre, ce qui correspond au passage d'une forme collective à une autre. A noter qu'un système peut aussi transiter d'un état de désordre à un état d'ordre et inversement. Quel que soit le type de transition, le(s) paramètre(s) qui amène(nt) le système à changer d'états est (sont) appelé (s) paramètre(s) de contrôle (ici, le gradient de température). De plus, une transition est caractérisée par deux signatures typiques : (1) un accroissement des fluctuations au voisinage de la transition, (2) un phénomène d'hystérèse.

Une transition de phase est toujours précédée d'une augmentation des fluctuations du système ou fluctuations critiques. Ces fluctuations sont des propriétés stochastiques inhérentes à tout système dynamique (Haken, 1983), et sont décelables à travers l'augmentation de la variabilité de la variable collective. Cet accroissement des fluctuations est dû à la modification de la contrainte au voisinage du point critique, et reflète la déstabilisation de l'état dans lequel le système se trouvait. A un niveau de contrainte critique, ces fluctuations sont tellement importantes que la forme collective ne peut être maintenue (perte totale de stabilité) amenant le système à adopter une nouvelle forme plus adaptée et plus stable. Au moment de la transition, c'est le changement de la variable collective (par perte de sa stabilité) qui accompagne le changement de la configuration, qui permet son identification.

Le phénomène d'hystérèse témoigne du fait que le passage d'un état à un autre ne se fait pas à la même valeur du paramètre de contrôle en fonction de son sens de progression (augmentation et diminution). Si nous reprenons l'expérience de Bénard, la création des rouleaux apparaît pour un certain gradient de température. Si l'expérience était réalisée dans l'autre sens, en diminuant le paramètre de contrôle (e.g. gradient de température), la transition entre les deux formes collectives (des molécules formant des rouleaux vers les molécules sans mouvement d'ensemble) apparaîtrait pour un gradient de température bien plus faible que lorsque l'expérience est réalisée à sens inverse. Il semble y avoir une certaine résistance au changement qui maintient le système dans son état initial stable (rouleaux).

Enfin, la transition de phase et le phénomène d'hystérèse sont des indicateurs de la non-linéarité du système, facteur clef des processus d'auto-organisation.

#### 1.1.4 Importance de la non-linéarité :

Si ce concept a longtemps été négligé, les avancées scientifiques montrent aujourd'hui « que la nature est impitoyablement non-linéaire » (Stewart, 1998). Dans l'exemple des rouleaux de Bénard, l'influence de celle-ci est dominante dans le sens où elle entraîne le système à transiter d'un ordre à un autre (les rouleaux).

Un système, s'il est linéaire, n'a pas de solution préférée. Un changement dans les paramètres entraîne systématiquement un changement de l'état dans lequel se trouve le système. Si le système dans l'expérimentation de Bénard était linéaire, une variation dans le gradient de température amènerait systématiquement une variation dans l'état du fluide, et ce de manière proportionnelle. Un système linéaire est dit sensible linéairement à des modifications de paramètres: différents comportements résultent de différents paramètres du système. De même, si une perturbation quelconque est appliquée sur le système alors qu'il est dans un état stable, le système va forcément changer d'état et ne va pas revenir à son état initial. A l'inverse, la non-linéarité d'un système rend la moindre variation de paramètres ou la moindre perturbation de structures susceptible de déclencher une transition, qu'elle se fasse de désordre à ordre (ou inversement) ou d'ordre à ordre (comme dans notre exemple). Par contre, si le système se trouve dans un état stable, il sera capable d'y revenir après une perturbation.

Dans l'expérience de Bénard, alors que le gradient de température augmente de façon graduelle, rien ne se passe au niveau macroscopique jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur critique faisant émerger une nouvelle forme collective (e.g. les rouleaux). Cette discontinuité temporelle montre qu'il n'y a pas de relation linéaire entre la modification d'un paramètre (le gradient de température) et sa conséquence sur le comportement du système (variable collective).

Tous ces phénomènes de formation de formes collectives stables, de multistabilité, de transitions de phase avec perte de stabilité et hystérèse, constituent les propriétés fondamentales d'un système auto-organisé.

Si nous avons pris ici un exemple issu des sciences physiques, pour Kelso et al. (1993), « les mêmes principes peuvent être appliqués à tout système complexe sans tenir compte de leur substrats matériels ». Les systèmes biologiques et le système moteur (système neuro-musculo-squelettiques) étant des systèmes complexes et ouverts, ces mêmes principes devraient être observables.

Ainsi, partant du constat de Bernstein (1967) sur l'extrême complexité du système d'effection neuro-musculo-squelettique et sur les fortes non-linéarités qui caractérisent les divers couplages multi-segmentaires, toute coordination motrice peut alors être envisagée comme la résultante de processus d'auto-organisation (Kelso, 1981). De nombreuses études ont alors démontré qu'une coordination rythmique inter-segmentaire était caractérisée par l'interaction des segments impliqués dans la tâche (Kelso, Holt, Rubin, & Kugler, 1981; Von Holst, 1973).

Par exemple, l'effet magnétique de Von Holst (1973) montre parfaitement la similitude entre les systèmes biologiques vivants et les systèmes physiques ou chimiques. Ce biologiste a travaillé sur les mouvements rythmiques des nageoires d'un poisson appelé *Labrus*. Ces résultats révèlent que la coordination entre les deux nageoires, pourtant de fréquences propres différentes, tend sous l'effet magnétique (*magnet effect*) vers une synchronisation des fréquences entre les nageoires. Ce phénomène rappelle la création d'ordre sous l'effet de la température dans l'expérience des rouleaux de Bénard. Plus explicite encore, Von Holst (1973) a montré que la suppression progressive de plusieurs paires de pattes chez le mille-pattes modifie systématiquement son mode de locomotion et le conduit à adopter une coordination similaire aux animaux ayant le même nombre de paires de pattes. Ainsi à la fin de l'expérience, le mille-pattes adopte le mode de coordination typique des quadrupèdes. Cette expérience montre clairement la présence de mécanismes de couplages segmentaires temporaires et auto-organisés, variant en fonction des contraintes de la tâche (ici le nombre de paires de pattes). L'expérience de Hoyt et Taylor (1981) a de la même façon montré l'émergence de différentes coordinations chez le cheval en fonction de la vitesse de déplacement imposée par le tapis roulant. Ainsi, pour une vitesse donnée, plusieurs modes de déplacements peuvent être adoptés (bistabilité) mais au-delà d'une vitesse critique, seul le galop devient possible (monostabilité). Il y a donc là une succession d'émergences de formes (pas, trot, galop), disponibles ou non en fonction des contraintes imposées.

L'apparition ou la dissolution brutale et spontanée de ces coordinations en fonction des contraintes s'apparente à des phénomènes dynamiques non-linéaires également retrouvés dans la motricité humaine. La transition marche-course par exemple (Diedrich & Warren, 1995) se plie en effet aux mêmes principes dynamiques que la transition entre deux modes de coordination chez le cheval.

Ainsi, l'extension d'une telle approche au niveau de la motricité humaine peut permettre la réduction du nombre de variables nécessaires pour décrire la formation de

patrons de coordination stables, ainsi que le changement de patron pour une tâche de coordination donnée. Elle offre donc des outils et un cadre conceptuel extrêmement intéressant pour comprendre la production de mouvements, et son évolution, notamment lors de l'apprentissage d'une tâche motrice.

## 1.2 Auto-organisation et coordination motrice

### 1.2.1 Principes d'auto-organisation appliqués aux coordinations motrices

Le système neuro-musculo-squelettique se compose de plus de 790 muscles permettant la mobilisation de 110 articulations dans des directions opposées (sans compter le nombre de cellules nerveuses, et les sous-systèmes fonctionnels). Effectuer un mouvement coordonné s'apparente donc pour le système nerveux à un problème de réduction et de gestion des degrés de liberté d'un système multi-articulaire ou multi-segmentaire complexe (Bernstein, 1967). Pour cet auteur, la clef de l'élaboration d'une coordination motrice se traduit par la maîtrise des degrés de liberté redondants du système d'action (constitué de l'ensemble des composants nécessaires à la réalisation d'une tâche spécifique) et leur incorporation au sein d'une unité facilement contrôlable.

Dans le contexte de la motricité humaine, le processus d'auto-organisation est alors envisagé comme étant à l'origine de l'émergence des synergies (Jeka & Kelso, 1989), à savoir une ou des forme(s) collective(s) qui corresponde(nt) à un ensemble de composantes neuromusculaires assemblées spatio-temporellement pour accomplir une tâche spécifique. Walter, Swinnen, Corcos, Pollatou et Pan (1997) définissent d'ailleurs toute coordination motrice comme étant le résultat d'un ordre spatio-temporel émergent de ce processus d'auto-organisation.

L'arrivée dans les sciences du comportement des théories de l'auto-organisation va donc offrir une nouvelle lecture de la gestion du mouvement par le SNC. La réduction des degrés de liberté d'un système d'action va résulter de couplages s'opérant entre les différents composants, sous l'effet des contraintes appliquées au système, exactement sur le même principe que les rouleaux de Bénard. La variable collective suffisant à décrire la coordination, cette approche permet de répondre au problème de la gestion des nombreux degrés de liberté dans le système moteur par le système nerveux central. Le SNC réduit en fait les degrés de liberté en contrôlant l'action à travers une seule variable, la variable

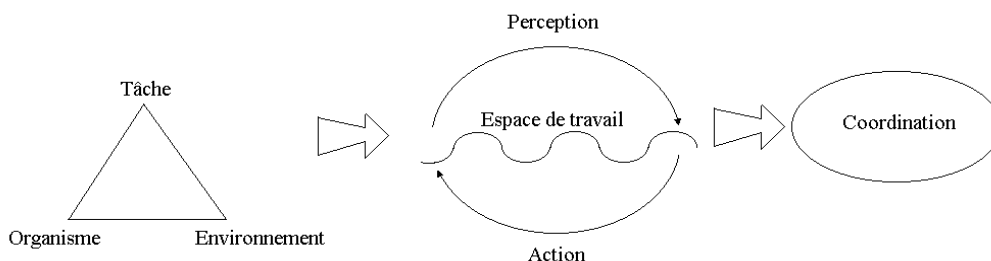
collective, plutôt que de les gérer de façon prescriptive dans leur quasi-totalité par le biais de programmes moteurs (Schmidt, 1975; Schmidt & Lee, 1998).

Dans cette perspective (e.g., appliquer les lois de la synergie au contrôle moteur), l'apparition et la dissolution des modes de coordination sont considérés comme des phénomènes émergents résultant des mécanismes de dissipation d'énergie et d'auto-organisation qui se déroulent au sein du système d'action à coordonner (Kelso, 1995).

Pour comprendre cette émergence de patrons de coordination motrice et plus généralement les principes communs qui s'appliquent à la production de comportements moteurs coordonnés, il convient d'utiliser la « stratégie synergétique » (Kelso & Schöner, 1987; Kelso, Schöner, Scholz, & Haken, 1987). Celle-ci consiste dans un premier temps à identifier les variables pertinentes dans la tâche étudiée, à savoir les paramètres d'ordre et de contrôle. Pour cela, il faut se situer aux alentours des transitions de phase, permettant de distinguer clairement les différents patrons de coordination présents. La deuxième étape consiste alors à étudier les signatures de la dynamique auto-organisée de ces coordinations motrices (stabilité et perte de stabilité, transitions, fluctuations, etc.). Enfin, la dernière étape a pour objectif de formaliser les observations expérimentales grâce aux modèles dynamiques, comme les équations de mouvements et la fonction potentiel (Temprado & Montagne, 2001).

### 1.2.2 Les contraintes

En premier lieu, l'application des théories d'auto-organisation à la motricité implique que les patrons de coordination et leurs contrôles vont émerger de l'interaction des différentes contraintes qui pèsent sur le système (Figure 2).



**Figure 2** : Emergence des coordinations sous l'influence de diverses contraintes

D'une manière générale, ces contraintes peuvent se définir comme l'ensemble des facteurs qui limitent les degrés de liberté du système, c'est-à-dire ses possibilités d'action (Kugler, 1986). Pour comprendre les adaptations qualitatives et/ou quantitatives du comportement moteur humain, il est donc nécessaire de décrypter la nature de ces contraintes spécifiques au contrôle moteur. D'après (Newell, 1986), celles-ci peuvent être de natures différentes, en étant liées soit à l'organisme, soit à l'environnement, ou à la tâche.

Les contraintes liées à l'organisme renvoient aux contraintes structurelles propres au sujet (i.e. caractéristiques physiques comme la taille et le poids) et aux contraintes fonctionnelles (i.e. état momentané de l'organisme comme la fatigue ou l'activation neurologique). Enfin, ces contraintes font appel à l'histoire du sujet, aux habiletés et aux connaissances acquises antérieurement. Pour Bingham (1988), cela renvoie aux contraintes inhérentes au système neuro-musculo-squelettique, propres à chacun, en opposition aux contraintes incidentes, définies par les caractéristiques spécifiques de la tâche et/ou du contexte environnemental.

D'après Newell (1986), les contraintes liées à la tâche correspondent aux structures physiques externes, tels que les instruments et dispositifs utilisés, et à l'ensemble des informations données relatives au but de la tâche et à la coordination à réaliser. Pour Bingham (1988), les informations données renvoient à des contraintes incidentes quand elles sont clairement spécifiées, alors que dans le cas contraire, le sujet peut s'auto-assigner un objectif, renvoyant aux contraintes inhérentes au sujet.

Enfin, les contraintes environnementales rassemblent des facteurs moins proximaux, tels que le climat ou la luminosité.

Pour finir, ces catégorisations ne doivent pas laisser entendre qu'une contrainte est en soi responsable de l'émergence du comportement. C'est toujours l'interaction entre ces multiples contraintes qui suscite l'apparition de tel ou tel pattern comportemental, quand bien même il est possible de définir un rôle prédominant de telle ou telle contrainte sur la dynamique résultante (Delignières, Nourrit, Deschamps, Lauriot & Caillou, 1999 ; Kelso & Jeka, 1992 ; Scholz & Kelso, 1990 ; Temprado, Zanone, Monno & Laurent, 1999).

### 1.2.3 Formation de patrons

Sous l'influence de ces différentes contraintes, un comportement va alors émerger spontanément. L'exemple le plus connu de formation spontanée de patrons de coordination dans une tâche de coordination motrice est celui de la coordination bimanuelle, étudiée par Kelso (Kelso, 1984; Kelso et al., 1981). Dans cette expérience, les participants devaient bouger leurs doigts homologues (index) à une fréquence commune. Malgré le nombre important de possibilités de coordination de leurs index, les participants adoptaient spontanément deux patrons seulement, chacun à des fréquences variées. Ces patrons de coordination correspondaient au patron en phase (contraction simultanée des muscles homologues) et au patron en antiphase (contraction alternée des muscles non homologues). Ces états du système qui apparaissent spontanément en réponse aux contraintes de l'environnement et vers lesquels le système converge chaque fois qu'il est dans des conditions identiques sont appelés attracteurs du système, ou modes de coordination préférentiels. Dans la tâche de coordination bimanuelle proposée, seuls deux attracteurs émergent pour un même niveau de contrainte, suggérant que nous soyons en présence d'un système bistable.

La variable collective capable de quantifier ces deux relations spatio-temporelles, à savoir la phase et l'antiphase, est la phase relative. La phase relative correspond au décalage temporel entre les mouvements de flexion/extension des deux index au cours du temps (Kay et al., 1987). La phase relative permet donc de voir l'évolution au cours du temps du couplage entre les deux oscillateurs que sont les index. Le patron en phase se définit par une valeur de phase relative de  $0^\circ$ , c'est-à-dire par un mode de coordination où le décalage temporel entre les deux index est de 0 ms aux points de revirements du mouvement. Le patron en antiphase correspond lui à un patron de coordinations où les deux index ont un décalage temporel d'un demi-cycle, soit une valeur de phase relative de  $180^\circ$ . Ces patrons de coordination sont donc caractérisés par une synchronisation absolue des phases, mais aussi des fréquences, dans le sens où les deux index oscillent chacun à la même fréquence, exprimant un rapport de fréquence type 1 :1. De nombreuses expériences sur les coordinations bimanuelles (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, Scholz, & Schöner, 1988; Swinnen, Dounskaia, Walter, & Serrien, 1997; Zanone & Kelso, 1992) ont montré cette tendance à la synchronisation des phases et des fréquences, définie par l'adoption de coordinations spontanées caractérisées par un verrouillage des fréquences (rapport 1 :1) et une stricte synchronisation des points de revirements des oscillateurs

couplés. Le rapport de fréquence constitue donc un autre paramètre d'ordre possible du système, très utilisé dans les tâches polyrythmiques ou coordinations multifréquentielles (Beek, Peper, & van Wieringen, 1992 ; Jagacinski, Peper & Beek, 2000 ; Peper, Beek & van Wieringen, 1995a, 1995b ; Peper, Beek & van Wieringen, 1991). Ces expériences ont clairement montré que les rapports de faible ordre (avec dénominateur et numérateur faibles) sont réalisés beaucoup plus aisément que les rapports d'ordre élevé (e.g. 8 :3), et surtout que le rapport 1 :1 peut être considéré comme un attracteur puissant du système. Ce principe de verrouillage des fréquences a aussi été illustré dans des expériences de coordination entre le haut et le bas du corps (Kelso & Jeka, 1992; Muzii, Lamm Warburg, & Gentile, 1984), mais aussi sur des tâches mettant en jeu l'ensemble du corps, comme le simulateur de ski, où il existe un verrouillage de fréquence entre les mouvements de l'appareil et le centre de gravité (Vereijken, 1991), ou les balancers au barres parallèles (Delignières et al., 1998) .

De la même façon la tendance à la synchronisation des points de revirements a été retrouvée dans de nombreuses études, qu'elles portent sur des coordinations inter-articulaires (Buchanan & Kelso, 1993; Kelso, Buchanan, & Wallace, 1991), sur des coordinations inter-segmentaires (Jeka, Kelso, & Kiemel, 1993), sur des tâches gymniques (Delignières et al., 1998), sur la locomotion (Diedrich & Warren, 1995; Hoyt & Taylor, 1981), la posture (Bardy, Marin, Stoffregen, & Bootsma, 1999; Marin, Bardy, Baumberger, Flückiger, & Stoffregen, 1999) ou sur les relations interpersonnelles (Schmidt, Carello, & Turvey, 1990).

Pour Kelso et Jeka (1992), « cette tendance à la synchronisation des phases et des fréquences est générale dans les systèmes naturels et artificiels, représentant une forme fondamentale d'auto-organisation ». Au-delà de cette synchronisation, les patrons de coordination préférentiels possèdent deux critères fondamentaux qui sont la stabilité et l'attraction (Turvey, 1990), sans lesquels ils ne peuvent se définir comme tels.

## 1.2.4 Propriétés des patrons de coordination préférentiels

### 1.2.4.1 *La stabilité*

La stabilité d'un mode de coordination est sa capacité à se maintenir en dépit des fluctuations inhérentes au système et de perturbations diverses pouvant survenir lors de son exécution. Donc plus un patron est stable, plus il est capable de résister aux variations de

contraintes. Dans la tâche de coordination bimanuelle, il y a deux modes de coordination stables, la phase et l'anti-phase. Cependant, il a été montré que ces deux patrons n'ont pas la même stabilité (Kelso et al., 1981; Kelso & Scholz, 1985; Kelso & Schöner, 1987; Scholz & Kelso, 1989), la phase étant intrinsèquement plus stable que l'anti-phase. Cette stabilité peut être mesurée à travers l'étude du temps de relaxation, correspondant au temps que met le système à retrouver son état initial après perturbation. La phase étant plus stable, le système revient plus vite sur ce mode de coordination que sur le mode en anti-phase pour un même niveau de perturbation. Une autre façon de mesurer la stabilité d'un patron consiste à mesurer la déviation standard de la variable collective, ici la phase relative (Schöner, Haken, & Kelso, 1986). Plus cette déviation est minime, plus le patron est stable.

La connaissance de la stabilité relative des patrons stables permet ainsi de faire des prédictions robustes et testables concernant la capacité d'adaptation du système à une modification de contraintes, qu'elles soient de nature non spécifique (i.e., ne prescrivant pas le patron à adopter) ou spécifique à la tâche (i.e., prescrivant le patron à adopter).

#### *1.2.4.2 Attraction et propriétés d'inaccessibilité*

Une autre propriété de ces patrons de coordination préférentiels est qu'ils se comportent comme des attracteurs qui tendent à attirer vers eux toutes les configurations motrices qui se situent au voisinage (Abraham & Shaw, 1982). En effet, comme l'auto-organisation restreint le nombre de modes de coordination adoptables par un système, toutes les autres possibilités de coordinations sont instables et difficilement reproductibles. Turvey (1990) définit cela en terme de propriétés d'inaccessibilité des systèmes auto-organisés.

Ainsi quand un sujet aura pour consigne de produire une coordination ne correspondant pas à ses patrons de coordination préférentiels, cette coordination à apprendre rentrera en compétition avec ses patrons préférés, amenant le sujet à produire des erreurs systématiques en direction du patron préférentiel le plus proche (Schöner & Kelso, 1988b). Cette propriété est repérable grâce à des paradigmes expérimentaux appelés *scanning* (Tuller & Kelso, 1985; Yamanishi, Kawato, & Suzuki, 1980; Zanone & Kelso, 1992, 1997) où le sujet doit produire différentes phases relatives. Ces expériences montrent clairement la présence de patrons préférentiels vers lesquelles toutes les autres coordinations sont attirées. Dans un tel système, la présence de patrons de coordination

préférentiels rend alors difficile voire impossible la production d'autres patrons de coordination et gouverne toute la performance motrice.

### 1.2.5 Les transitions de phase

Cependant, l'homme a en lui des ressources cognitives qui lui permettent de moduler ses performances motrices. Il est donc imaginable que les changements de coordinations ne seront pas identiques en fonction du caractère intentionnel ou non de la transition. Mais pour comprendre les diverses caractéristiques des transitions de phases il est nécessaire d'aborder certaines notions issues des systèmes dynamiques non-linéaires que la théorie dynamique des coordinations motrices a intégré dans son langage au même titre que les concepts d'auto-organisation.

#### 1.2.5.1 *Concepts issus des systèmes dynamiques non-linéaires*

Ce besoin de se servir des concepts et langages issus des systèmes dynamiques non-linéaires vient de la volonté de l'approche dynamique des coordinations motrices à vouloir décrire et prédire le comportement moteur à un niveau macroscopique, c'est-à-dire au niveau de la variable collective. A partir de là, la notion de système dynamique devient essentielle car elle fait appel à tout système évoluant au cours du temps, quelle que soit sa nature (Bergé, Pomeau, & Vidal, 1984). Elle permet donc la formalisation mathématique de l'évolution temporelle des comportements observés et plus exactement de la variable collective. Cette formalisation dessine alors les attracteurs du système, c'est-à-dire la solution (ou les solutions) vers laquelle convergent toutes les trajectoires du système dans le temps. Un attracteur est donc une description mathématique des patrons de coordination préférentiels. A l'inverse, un repellant est un point d'équilibre instable, que les trajectoires du système vont fuir à la moindre perturbation.

Pour modéliser les coordinations sous forme d'attracteurs ou de repellants, cette approche dynamique des coordinations motrices assimile celles-ci à un couplage non-linéaire entre des oscillateurs biologiques (Kelso et al., 1981; Kugler, Kelso, & Turvey, 1980). Les principes d'auto-organisation peuvent donc être retrouvés et étudiés finement dans leur évolution temporelle grâce à l'adoption des outils issus des systèmes dynamiques non-linéaires. Ces systèmes permettent en effet de rendre compte de la coexistence de plusieurs attracteurs, cas de figure souvent observé dans les systèmes complexes et

notamment biologiques, ainsi que des transitions de phase non-linéaires (ou bifurcations dans leur dénomination mathématique) qui existent lors du passage d'un attracteur à un autre en réponse à une modification du paramètre de contrôle (Kugler et al., 1980). Cet enrichissement mathématique va alors permettre de différencier les différents types de transitions retrouvés dans la motricité humaine, et permettre l'adoption de modèles prédictifs en fonction des contraintes de départ. Nous ne ferons pas ici une revue exhaustive de ces transitions, le but étant de voir l'importance des contraintes initiales sur l'évolution de la dynamique spontanée de coordination.

#### 1.2.5.2 *Changement spontané*

L'étude des changements spontanés a pour but premier de comprendre la dynamique de la production motrice au niveau bimanuel, de voir si celle-ci corrobore les principes fondamentaux des systèmes auto-organisés, et dans un second temps de voir si cette dynamique est généralisable à d'autres coordinations.

Les premières expériences ayant montré cette similitude entre les comportements du système moteur et ceux de systèmes auto-organisés sont celles de Kelso (1981, 1984) sur les coordinations entre les index. Dans cette tâche, les sujets devaient bouger leurs index à 180° de phase relative (e.g, patron en anti-phase ou contraction simultanée des muscles non-homologues). Ils leur étaient demandé de « se laisser aller », de ne pas fournir d'effort pour maintenir ce patron de coordination. Avec l'augmentation graduelle de la fréquence de mouvement (ou paramètre de contrôle), les participants finissaient par transiter vers le patron de coordination en phase (0° de phase relative), de manière soudaine, pour une valeur critique de la fréquence de mouvement (autour de 2.25Hz). A l'inverse, lorsque les sujets devaient produire un patron en phase, la diminution de la fréquence d'oscillation n'engendrait pas de modification de patron, ce qui peut être analysé comme une manifestation du phénomène d'hystérèse. De plus, le changement entre le mode en anti-phase et phase était précédé par une augmentation des fluctuations de la phase relative. Ici, les deux signatures typiques d'une transition de phase sont retrouvées avec l'évolution graduelle de la fréquence qui engendre un changement abrupt de la phase relative, indiquant la non-linéarité du système étudié (Kelso, 1981).

La transition observée ici est caractéristique d'une bifurcation en fourche (super-critique) possédant deux attracteurs au départ, et qui après atteinte de la valeur critique du paramètre de contrôle n'en possède plus qu'un seul.

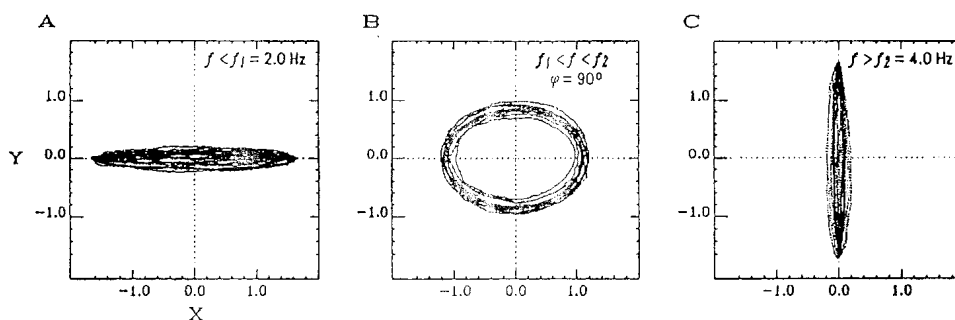
Enfin, les résultats de cette expérimentation laissent sous-entendre l'importance du phénomène de stabilité de patron, puisque ici, le système fortement contraint par l'augmentation de fréquence se réfugie sur son attracteur le plus stable. Ainsi, même si l'anti-phase est un patron préférentiel, sa moindre stabilité fait que le système lui préfère la phase que cela soit quand le système devient plus fortement contraint, ou quand le système adopte dès le départ son patron le plus stable.

Cette expérience a mis en évidence la présence de deux patrons de coordination préférentiels de stabilité différente, et la présence d'une transition soudaine du patron en anti-phase vers le patron en phase, avec absence de réversibilité de cette transition. L'identification de ces propriétés semble corroborer parfaitement les processus d'auto-organisation identifiés dans les systèmes physico-chimiques. De plus, ces processus sont mis en avant à l'aide d'une seule et unique variable, la phase relative entre les composantes (i.e., deux index), qui étudiée au cours du temps (étude dynamique), permet de rendre compte de toute la dynamique macroscopique du système étudié (Kay et al., 1987; Kelso et al., 1988; Scholz, Kelso, & Schöner, 1987). D'un point de vue théorique, l'ensemble de ces phénomènes comportementaux (patrons préférentiels présentant une stabilité différente, transition...) est regroupé sous le terme de dynamique de coordination spontanée ou dynamique intrinsèque (Schöner & Kelso, 1988b) de la coordination bimanuelle (donc propre au système étudié). Cette dynamique répond simplement à la dynamique de la phase relative entre les composantes rythmiques du système (Haken et al., 1985).

Cette dynamique spontanée a été par la suite retrouvée dans de nombreuses études portant sur les coordinations bimanuelles (Kelso, 1984), sur les coordinations entre stimulus externe et un membre (Kelso, Delcolle, & Schöner, 1990; Wimmers, Beek, & van Wieringen, 1992), et sur les coordinations inter-articulaires (Buchanan & Kelso, 1993; Kelso, Buchanan et al., 1991). Néanmoins, toutes ces études se sont focalisées sur des systèmes ayant seulement deux patrons stables. Donc dès l'instant où un patron perd de la stabilité, le patron restant est adopté. La situation devient plus compliquée quand il y a plus de deux composants mis en jeu car beaucoup plus de modes de coordination sont possibles (avec des couplages directs et indirects). Sachant que cette dynamique est propre au système étudié, il semble alors difficile de généraliser ces résultats pour des systèmes ayant plusieurs dimensions ou un plus grand nombre de segments sollicités. En effet, ce paradigme offre une lecture claire du comportement mais ne reflète qu'un mouvement réalisé en une dimension entre deux segments du corps. Or la plupart des activités motrices

sollicitent un nombre bien plus élevé de segments et se passent rarement dans une seule dimension.

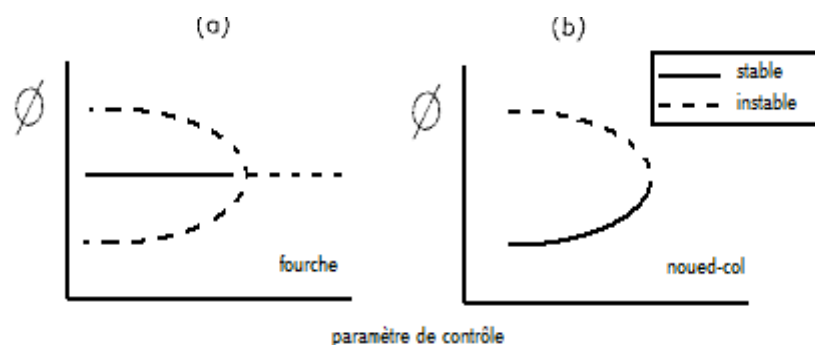
Ainsi, Buchanan, Kelso, de Guzman et Ding (1997) montrent sur une tâche de coordination unimanuelle en deux dimensions que les transitions entre les patrons peuvent se faire de manière abrupte ou graduelle. Une des conditions expérimentales consistait à produire des oscillations horizontales de l'index en étant synchronisé avec un métronome auditif. La fréquence était augmentée par palier et il était demandé aux sujets de ne pas intervenir quand ils sentaient que le patron de coordination changeait, en laissant émerger le patron le plus confortable pour eux. Contrairement aux expériences de Kelso décrites précédemment, les sujets avaient la possibilité d'osciller leur index en deux dimensions, sur le plan horizontal et vertical. Sous l'augmentation de la fréquence de mouvement, les sujets qui oscillaient leur index uniquement sur le plan horizontal, recrutaient la dimension verticale en supplément, produisant alors un trajet de forme elliptique. Puis ils délaissaient la composante horizontale pour se fixer uniquement sur un patron vertical (Figure 3). Buchanan analyse cette transition en tant que bifurcation de Hopf super-critique, correspondant au passage d'un point fixe (attracteur assimilé à un point stable) à un cycle limite (attracteur défini comme un ensemble de point parcourus cycliquement). En fait, l'augmentation graduelle des oscillations sur l'axe horizontal entraîne le recrutement de la dimension verticale pour former une ellipse, ou cycle limite. Enfin la disparition du cycle limite laissant place à un nouveau point fixe (oscillation verticale) correspond à la bifurcation de Hopf inversée.



**Figure 3 :** Modèle de bifurcation de Hopf lors du processus de recrutement et de suppression des dimensions verticales (Y) et horizontale (X), en fonction de la fréquence d'oscillation : (A) : le mouvement dans la direction X correspond à un cycle limite stable, et le mouvement dans la direction Y à un point fixe. (B) : avec l'augmentation de la fréquence, émergence d'une bifurcation de Hopf super-critique dans la direction Y. (C) : bifurcation de Hopf inversée dans la direction X, correspondant à une transition brutale du mouvement horizontal au mouvement vertical.

Source : d'après Buchanan et al. 1997, p. 25

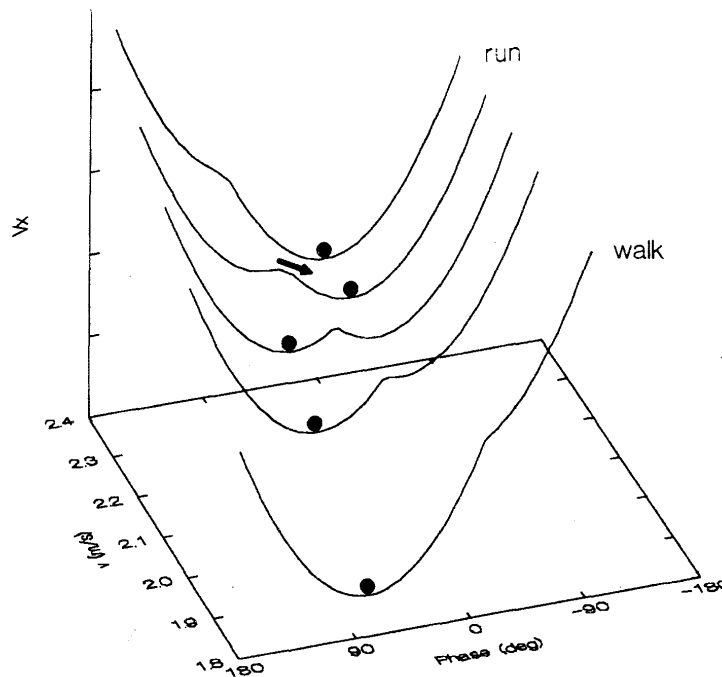
Le passage entre deux patrons, même de façon non-intentionnelle ne se fait donc pas toujours de manière abrupte. De même, Kelso et Jeka (1992), expliquent que la bifurcation en fourche rendant compte de la dynamique de coordination bimanuelle, n'est valable que parce que les deux oscillateurs (les deux index) ont la même fréquence propre (ou fréquence naturelle de chaque oscillateur), sans dominance d'un oscillateur sur l'autre, créant ainsi une symétrie caractéristique de base des bifurcations en fourche, où les points fixes (ou attracteurs) sont créés et disparaissent par paires. Pour casser cette symétrie, les auteurs ont mis au point un protocole expérimental permettant l'étude simultanée de différents membres. Ils demandaient aux sujets de bouger les bras et les jambes, soit ensemble soit de façon dissociée entre jambes et bras, soit de manière dissociée entre partie gauche et droite du corps. Ils montrent clairement que l'introduction d'oscillateurs de fréquences propres différentes fait rompre rapidement la dynamique de symétrie et leur permet de nouvelles prévisions sur la transition. Ainsi ils envisagent (et démontrent) une dérive du point fixe en direction du nouvel état et une préférence dans la direction vers la bifurcation elle-même, qui n'est plus alors en fourche mais en nœud-col (*saddle-node*) (voir Figure 4). Cette bifurcation est caractérisée par la fusion entre l'attracteur et le repellant, laissant ensuite un seul point fixe attracteur au système. Jeka et al. (1993) vont plus loin en montrant que lorsque la symétrie bras-jambe est maintenue, la transition d'un patron à un autre se fait sous la forme d'une bifurcation en fourche. Par contre lorsque cette symétrie est rompue, la transition devient une bifurcation de type *saddle-node* avec une dérive du point fixe systématique avant la transition, qui va entraîner la transition dans sa direction.



**Figure 4** : Diagrammes de bifurcations montrant l'évolution de points stables et instables en fonction du paramètre de contrôle (e.g., fréquence requise) dans le cas (a) où la symétrie avant-arrière est préservée et (b) où il n'y a pas de symétrie. On note la dérive systématique du point fixe stable en (b) non présente en (a).

Source : d'après Jeka *et al.* (1993),p.645.

Dietrich & Warren (95) retrouvent cette dérive du patron avant la transition, dans une expérience sur la transition marche-course. Ils montrent aussi que la stabilité à l'approche de la transition est très faible lorsque les deux bassins d'attraction sont présents, définissant les états adoptables par le système (Figure 5). Cette présence de deux attracteurs concurrents accessibles simultanément mais avec une stabilité intrinsèque faible est un phénomène connu pour être généré par une bifurcation de type *saddle-node*. Bifurcation dont Dietrich et Warren (1995) se servent pour modéliser la transition marche-course sous l'augmentation de la vitesse de déplacement.



**Figure 5 :** Représentation de la fonction de potentiel pour la transition marche-course. Quand la vitesse augmente ( $y$ ), le système (représenté par les billes) passe de l'attracteur marche, qui a une phase relative stable et une vitesse préférentielle, à une région instable, puis saute vers l'attracteur course qui correspond à une phase relative stable et une vitesse préférentielle différente.

Source : d'après Dietrich et al. (1995), p. 185

Il faut noter que dans une tâche de locomotion, la symétrie bras-jambe est bien cassée, confirmant l'hypothèse de Jeka et al. (93), sur l'importance des symétries sur la dynamique des coordinations. En effet, ce modèle de transition permet de rendre compte de la dynamique de coordination dans la motricité complexe incluant des symétries, des asymétries et des modes de coordination multiples. On voit donc que la coordination humaine n'est pas simple et qu'en fonction de la nature de la coordination à réaliser, la dynamique de coordination ne sera pas identique.

Par contre, toutes les études présentées ici font référence à des transitions entre des coordinations appartenant déjà au répertoire des patrons moteurs préférentiels du sujet. Or ces modes de coordination n'épuisent pas l'ensemble des patrons qu'un sujet peut adopter pour s'adapter aux différentes tâches auxquelles il est confronté. D'où l'émergence d'une autre génération de travaux prenant en compte la flexibilité adaptative de la dynamique spontanée des coordinations notamment sous l'effet des contraintes intentionnelles, attentionnelles, informationnelles ou comme le résultat de l'apprentissage (Temprado & Laurent, 2000).

### *1.2.5.3 Changement intentionnel*

Les premiers travaux portent sur les effets de l'intention (Carson, Goodman, Kelso, & Elliot, 1994; Scholz & Kelso, 1990), et sur la dynamique de coordination bimanuelle. Lors de ces expériences, les sujets devaient intentionnellement passer du patron en phase à celui en anti-phase, ou inversement, dès l'audition d'un stimulus sonore. Le temps de transition mesuré correspondait au temps nécessaire pour produire un nouveau patron stable. Ici, l'intention déstabilise le patron en cours d'exécution, et la force d'attraction de l'autre patron préférentiel attire le système vers celui-ci. Le patron en anti-phase étant intrinsèquement moins stable que le patron en phase, ces expériences ont révélé que la transition vers le mode en phase était plus rapide que la transition vers le mode en anti-phase. Et plus la fréquence de mouvement est augmentée, plus cette transition de l'anti-phase vers la phase est rapide, laissant sous-entendre que plus la stabilité du premier patron est faible, plus l'intention va permettre une transition rapide vers un autre mode de coordination préférentiel.

Il faut cependant noter le fait que dans le cas d'une transition intentionnelle la déstabilisation du patron initial est prescrite par la tâche elle-même. Ceci engendre une différence fondamentale par rapport aux transitions non intentionnelles qu'est l'absence d'une augmentation des fluctuations de la variable collective à l'approche de la transition. Par contre, comme pour les transitions spontanées, l'ensemble de ces études a confirmé que les processus de changement intentionnel de patrons étaient également sous l'emprise de la dynamique de coordinations spontanées du système (Carson, Byblow, Abernethy, & Summers, 1996; Carson et al., 1994).

D'autres études ont aussi révélé que l'intention permettait de lutter contre les transitions entre deux patrons, en étant par exemple capable de les retarder voir de les

inhiber (Lee, Blandin, & Proteau, 1996). D'autres travaux ont plus précisément porté sur le rôle de l'attention (Monno et al., 2000; Temprado, Chardenon, & Laurent, 2001; Temprado et al., 1999; Zanone, Temprado, & Monno, 1999) et ont mis en évidence un gain de stabilité des patrons préférentiels grâce à l'attention, qui est majoré pour le patron en anti-phase. Ces travaux ont montré que la stabilité spontanée des patrons préférentiels traduisait un investissement intentionnel et attentionnel implicite et minimal nécessaire pour produire et maintenir un patron que les sujets peuvent moduler volontairement (Temprado & Montagne, 2001). La dynamique spontanée est donc flexible en fonction de l'intention (e.g., spécification du patron à réaliser) et de l'attention portée à la tâche (force qui anime le couplage bimanuel spécifié par l'intention).

Là encore toutes les études menées portent sur des changements entre patrons préférentiels. Zanone et Kelso (1992, 1997) ont cherché à voir comment un sujet pouvait intentionnellement apprendre un nouveau patron, en s'appuyant sur les protocoles expérimentaux de Yamanishi et al. (1990) et de Tuller et Kelso (1989). Les sujets devaient apprendre à produire avec leurs index une phase relative de  $90^\circ$ , coordination qui n'appartenait pas à leur répertoire de patrons préférentiels, testés à l'aide d'une procédure de scanning. La répétition de la procédure en fin d'apprentissage a permis de montrer que le  $90^\circ$  est devenu un attracteur de la dynamique de coordination, au même titre que le  $270^\circ$  pourtant non appris mais symétrique au  $90^\circ$ . Zanone et Kelso (1992) définissent ici le passage d'une dynamique de coordination bi-stable à une dynamique de coordination multi-stable comme une transition de phase de type fourche. Ceci est en accord avec les principes émis par Jeka et al. (1993) puisque nous sommes bien ici en présence d'une tâche où la symétrie n'est pas rompue et où les attracteurs apparaissent par paires. Par contre, ces expériences révèlent que si le patron à apprendre est proche du patron préférentiel, aucune transition ne sera observée.

Le type de transition observée dans la motricité humaine n'est donc pas uniforme cependant il dépend toujours de la dynamique de coordination spontanée du système complexe étudié. Si dans les travaux fondateurs une bifurcation en fourche est révélée, la poursuite des recherches a montré que cette dynamique pouvait varier en fonction de la symétrie de coordination, du nombre de dimensions, de l'intention et de sa force, et de l'apprentissage, donnant lieu à divers types de transition entre les différents patrons.

Cette partie montre à quel point le système moteur est gouverné par la présence des patrons de coordination auto-organisés. Le but des théories dynamiques des coordinations

motrices est évidemment de parvenir à proposer des prédictions concernant leurs capacités d'adaptation en réponse à une contrainte non spécifique (e.g., vitesse) ou spécifique (e.g., changement intentionnel). Ces prédictions ont permis d'envisager une perspective de recherche concernant l'apprentissage moteur, à propos de la compréhension des coordinations adoptées par les débutants ou les experts, mais surtout au niveau de l'analyse des différents chemins d'accès à l'expertise et de leur nature. Tous les outils et concepts exposés dans cette partie permettent en effet de répondre à la question de ce qui est appris, question bien longtemps délaissée par les diverses théories de l'apprentissage moteur.

## 2. Apprentissage moteur et dynamique des coordinations

Depuis une dizaine d'années, des travaux sur l'apprentissage ont été initiés dans le cadre de cette approche dynamique (Kelso & Zanone, 2002; Newell & Van Emmerik, 1989; Swinnen, Walter, & Shapiro, 1988; Vereijken, 1991; Zanone & Kelso, 1992, 1997), permettant d'orienter les recherches sur la question du « qu'est-ce qu'apprendre ». En effet, ces études ont pour caractéristiques communes (i) de se centrer sur la coordination motrice et non sur la performance réalisée, (ii) de prendre en compte les conditions initiales de l'apprentissage représentées par la dynamique intrinsèque sur ou contre laquelle viendra se greffer le patron à apprendre et enfin (iii) de prendre en compte l'évolution temporelle de la coordination permettant ainsi de placer la recherche au cœur du processus de l'apprentissage. Ces études ont ainsi apporté un nouvel éclairage sur l'acquisition des habiletés perceptivo-motrices, en changeant le niveau et l'échelle d'analyse de ce processus.

### 2.1 Définition de l'apprentissage moteur selon l'approche dynamique

Ainsi, dans cette approche, l'apprentissage moteur est soumis aux lois dynamiques. Le comportement exploratoire est donc orienté par ces lois lors de l'acquisition de l'habileté et non des procédures de recherches mnésiques intensives vers la bonne représentation, signatures des conceptions traditionnelles de l'apprentissage perceptivo-moteur. Ainsi, nous verrons que le comportement moteur se retrouve au cœur de ce processus, conçu comme discontinu et non-linéaire. Plus exactement, le problème de l'acquisition motrice est regardé sous l'angle du « comment » la coordination et le contrôle du corps sont gérés pour fournir une solution à un nouveau problème moteur.

#### 2.1.1 La coordination au centre de l'apprentissage

L'intérêt porté aux coordinations a été décuplé par les travaux de Bernstein (1967) qui cherchait à comprendre comment le système nerveux central était capable de gérer les nombreux degrés de liberté redondants à différents niveaux pour produire une action habile en y investissant un minimum d'effort. Il en a découlé des recherches sur l'identification des contraintes susceptibles de limiter les patrons de mouvements préférentiellement

exploités, et sur l'apprentissage, dépendant de ces contraintes. Dans ce cadre, l'apprentissage consistait à maîtriser les différents degrés de liberté en les convertissant en un système contrôlable, sous forme de structures coordinatives définies comme un ensemble de muscles et d'articulations agissant comme une simple unité fonctionnelle (Vereijken, 1991).

Ces travaux ont servi de point d'ancrage à la conception théorique de l'approche écologique des coordinations motrices. Cette théorie regroupe celles de la perception directe et de la dynamique des coordinations motrices. Les concepts tels que l'auto-organisation ont notamment permis d'apporter une réponse théoriquement fondée au problème de la réduction des degrés de liberté. La notion clé devient alors celle de la coordination émergente, qui permettra de jeter un nouveau regard sur l'apprentissage. Nous avons vu que celle-ci est dépendante des différentes contraintes qui pèsent sur le système (Newell, 1986), pouvant être liées à la tâche, à l'environnement ou à l'organisme. Cette définition suppose une interdépendance entre le sujet et l'environnement dans lequel il évolue et montre qu'en aucun cas le contrôle de la coordination n'est l'exclusivité de l'un ou de l'autre (Turvey, 1977). Dans leur réalité écologique, la tâche, l'environnement et l'organisme détiennent des propriétés physiques qui vont permettre au sujet d'obtenir des variables informationnelles et des variables cinétiques quand il va entrer en action. Cette perspective écologique émergente démontre l'intérêt de mettre au même niveau l'action et la perception (Gibson, 1966), responsables de la coordination produite. L'apprentissage résidera alors en la construction et/ou en la stabilisation d'un état attracteur comportemental (Zanone & Kelso, 1992) caractérisé par la découverte, dans l'espace des contraintes de la tâche, d'une relation spécifique entre variables essentielles de la coordination et variables informationnelles (Laurent & Temprado, 1995), qui satisfait au but de la tâche, et qui définit la coordination experte, autrement dit la solution optimale. Cette définition pose donc comme processus majeur la recherche d'une solution optimale quand les théories cognitives la conçoivent comme le produit de l'affinement d'une représentation mémorisée la plus juste de l'action à réaliser et qui va prescrire les dynamiques de mouvement en relation avec la tâche à réaliser. En ce sens, la pratique est caractérisée par la répétition d'une solution particulière au problème alors que dans la perspective dynamique-écologique, elle se définit par la répétition d'une résolution d'un problème moteur.

Cette conception de la production motrice, où l'action et la perception sont indissociables et où l'existence d'un système auto-organisé est révélée, amène à travailler à

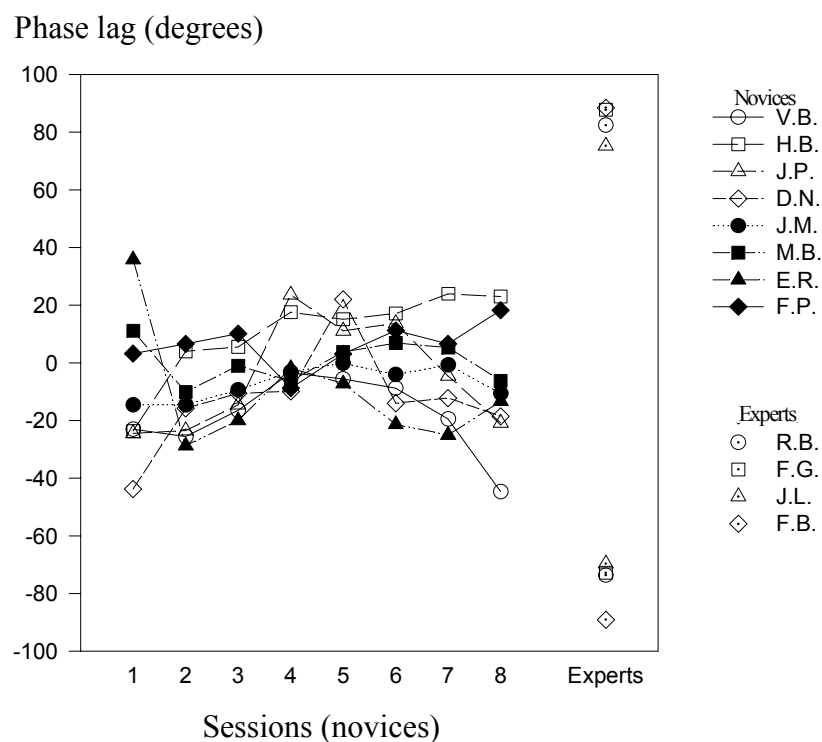
un niveau macroscopique, celui des coordinations. En effet, elles sont le reflet de cette auto-organisation entre l'acteur, l'environnement et la tâche qui lui est proposée. L'analyse des coordinations et de leur évolution permet ainsi de résumer à un niveau macroscopique l'interaction entre les différents paramètres intervenants dans l'apprentissage, que ce soit au niveau moteur ou informationnel.

Cependant, cet intérêt pour les coordinations n'a de sens que si les études portent sur des tâches mobilisant plus d'un degré de liberté biomécanique, l'inverse excluant évidemment tout problème de coordination à un niveau d'analyse comportementale (Newell, 1981). De même cet intérêt diminue quand le travail est fondé sur une tâche où le patron de coordination arrive à être produit par le sujet dès les premiers essais puisque cela ne permet pas de situer la frontière entre l'adaptation et l'apprentissage.

En effet, d'après den Brinker, Stabler, Whiting et van Wieringen (1985), la sélection de ce type de tâche ne permet pas d'observer les premiers stades de l'apprentissage, pourtant fondamentaux à sa compréhension. Or la plupart des études réalisées dans ce domaine de recherche se sont centrées sur des tâches répondant à l'un de ces deux critères voire aux deux simultanément. Ainsi le premier stade de l'apprentissage ou stade verbal-cognitif (Fitts, 1964), lors duquel le sujet cherche à identifier le but de la tâche et à construire un PMG, n'a pratiquement jamais pu être testé empiriquement. Sans doute l'impossibilité théorique des approches cognitives (que ce soit en référence au modèle proposé par Adams ou par Schmidt), à répondre à la question de la création d'un PMG face à une tâche totalement nouvelle n'a pas entraîné grand nombre de recherches dans ce domaine.

Si l'approche dynamique a d'autres limites, elle permet cependant de comprendre, voire même de prédire, les coordinations qui vont être adoptées lorsqu'une personne est face à une tâche nouvelle. En effet, cette théorie stipule que les contraintes restreignent les possibles du mouvement et font ainsi apparaître des coordinations préférentielles, caractérisées par une synchronisation des phases et des fréquences. Par exemple, Delignières et al.(1998) ont montré sur une tâche de balancers en position mi-renversée aux barres parallèles, que tous les débutants adoptaient la même coordination, caractérisée par un décalage de phase de  $0^\circ$  et un rapport de fréquence de 1/1 entre les oscillations verticale du centre de gravité au-dessus de la ligne d'épaule et les oscillations pendulaires de celui-ci par rapport aux mains. Cette expérience prouve que même sur des tâches sollicitant l'ensemble du corps (*gross motor skill*), les principes d'auto-organisation en fonction des contraintes s'appliquent. Cependant, une certaine variabilité inter-sujets est

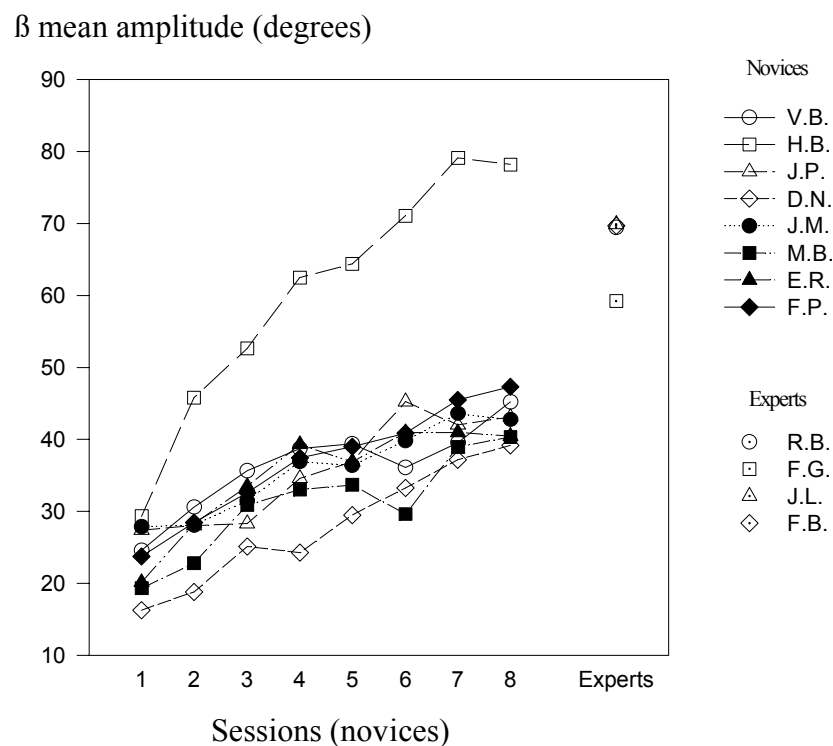
observée, certainement due aux contraintes liées à l'organisme qui diffèrent légèrement entre les participants. Néanmoins, leur comportement répond aux mêmes principes que ceux observés dans les diverses tâches multi-segmentaires, que nous avons évoqué dans la partie précédente. Sur cette même tâche, des gymnastes experts ont été testés. Il en ressort que tous adoptent un rapport de fréquence de 2 :1, avec un décalage de phase de  $90^\circ$  et de  $270^\circ$ . Une différence qualitative visible existe ici entre le patron de coordination des débutants et le patron adopté par les experts (Figure 6). Cependant, cette expérience menée sur 80 essais n'a pas permis d'entrevoir le passage entre ces deux coordinations. Or la question de la nature de cette évolution entre la coordination débutante et la coordination experte est fondamentale dans la compréhension de ce processus.



**Figure 6** : Evolution de la phase relative chez les novices, en fonction des sessions de pratique, et valeurs observées chez les experts (Nourrit et al. 2003).

## 2.1.2 Apprentissage et discontinuité

En regardant les graphiques résultants de cette expérience, il est évident que l'évolution des coordinations et de la performance n'est absolument pas similaire, et que le chemin pour accéder à l'expertise ne semble pas identique. En effet, l'évolution de l'amplitude des balancers au cours des essais (Figure 7) se rapprochent au fur et à mesure de l'amplitude produite par les experts. A ce niveau d'observation, l'apprentissage semble être un processus progressif, où l'affinement continu du programme moteur se reflète dans l'évolution de la performance. Le changement est ici de nature uniquement quantitative.



**Figure 7** Evolution de l'amplitude moyenne des balancers, en fonction des sessions de pratique chez les novices, et valeurs moyennes observées chez les experts (Nourrit et al., 2003).

Maintenant, l'analyse du graphique de l'évolution du décalage de phase (figure 6), révèle que le comportement stagne : après 80 essais, les sujets adoptent toujours un décalage de phase situé autour de  $0^\circ$  avec un rapport de fréquence en 1 :1. Pour accéder à l'expertise, les sujets vont, à un moment donné, devoir changer qualitativement de comportement puisque les experts exploitent un rapport de fréquence de 2 :1 avec des décalages de  $90^\circ$  et de  $270^\circ$ . Une discontinuité devrait donc intervenir dans le processus d'apprentissage à partir du moment où le sujet ne dispose pas directement de la bonne

coordination pour la tâche qui lui est proposée, et où le temps de pratique donné est assez conséquent pour permettre l'acquisition. Cette idée de processus discontinu a germé à la suite des premiers travaux sur l'apprentissage proposant un riche environnement perceptivo-moteur (Mc Donald, Van Emmerik, & Newell, 1989; Newell & Van Emmerik, 1989; Van Emmerik, Den Brinker, Vereijken, & Whiting, 1989). A partir de là, la représentation continue de l'apprentissage (par exemple sous la forme d'une loi Puissance) devient non plus une loi générale mais plutôt un cas particulier (Newell & Rosenbloom, 1981).

Cet exemple permet donc de comprendre l'intérêt d'observer l'apprentissage sur les niveaux d'analyse différents que sont la performance et la coordination, tant leur évolution diffère. De plus il expose clairement la nécessité de se centrer sur l'évolution des coordinations pour comprendre la nature même du processus, nature qui semble présenter un caractère discontinu et non-linéaire. L'apprentissage apparaît donc comme un déplacement, une transition d'un comportement initial au comportement expert, dans un espace contraint par les exigences de la tâche à réaliser.

Comme le soulignait Newell (1991) « cet effort pour comprendre les aspects écologiques pertinents des contraintes de la tâche, en relation avec l'interface dynamique mouvement et information, ouvre la porte à une théorie plus générale de l'acquisition des habiletés motrices ».

D'où l'intérêt de reconsidérer l'apprentissage à partir de l'analyse des contraintes de la tâche au travers du concept d'espace de travail perceptivo-moteur. La configuration de cet espace dépendra de l'interaction des différentes contraintes initiales et évoluera par la suite pour amener le sujet dans une région de travail correspondant à la solution optimale.

## 2.2 Recherche de la solution optimale

Au vu des principes d'auto-organisation, les débutants devraient logiquement tous adopter le même type de comportement. A partir de celui-ci, ils vont devoir emprunter un certain chemin dans l'espace de travail pour accéder à la solution optimale, chemin qui pourra éventuellement différer d'un individu à l'autre. Pour Fowler et Turvey (1978), l'acquisition motrice se décrit alors comme la recherche de l'optimisation des fonctions de coordination et de contrôle des variables spécifiant les caractéristiques essentielles de l'habileté. En d'autres termes, cette recherche, ou exploration, implique l'utilisation

optimale des forces réactives disponibles dans le but de réduire au minimum les forces générées par le sujet.

### 2.2.1 Les coordinations spontanées

L'identification des tendances spontanées de coordination est donc nécessaire pour comprendre le comportement des sujets novices et prédire son évolution. Un certain nombre d'expérimentations ont approché ce problème, que ce soit sur des tâches de coordinations bimanuelles (Beek et al., 1992; Peper et al., 1995a; Peper et al., 1991; C. E. Peper, P. J. Beek, & P. C. W. van Wieringen, 1995c; Swinnen & Walter, 1988; Walter & Swinnen, 1990), ou lors de tâches sollicitant l'ensemble du corps (Kelso & Jeka, 1992; Muzii et al., 1984; Vereijken, 1991). Toutes ces études ont révélé une forte tendance à la synchronisation, soit un verrouillage des phases et/ou des fréquences. Rappelons par exemple que, lorsque Beek et al. (1992) demandaient au sujet de produire un rapport de fréquence particulier comme du 2 :1, celui-ci transitait inévitablement vers un rapport d'ordre plus faible, le 1 :1, comportement beaucoup plus stable, dans lequel les deux oscillateurs sont synchrones. Ce type de comportement, caractérisé par un rapport de faible ordre, paraît susceptible de capturer le comportement du sujet débutant, et constitue pour Walter et Swinnen (1994) un biais systématique qui devra être dépassé pendant l'apprentissage pour pouvoir réaliser avec succès la coordination requise. Ces résultats ont été retrouvés dans l'expérience de Delignières et al. (1998) décrite précédemment.

De la même manière, dans des tâches isofréquencées, les sujets ont une préférence pour les coordinations en phase ( $0^\circ$ ) et en anti-phase ( $180^\circ$ ), durant desquelles les points de revirement de chaque oscillateur sont synchronisés. En contraste, une coordination avec un décalage de phase à  $90^\circ$  est difficilement réalisable, et nécessite souvent un apprentissage (Zanone et Kelso, 1992, 1997). D'après Swinnen, Walter, Lee et Dounskaia (1996), cette tendance suggère que le système nerveux central organise la coordination en exploitant les points de revirement comme des points d'ancrage critiques ou des lieux de contrôle intermittents.

Dans l'expérience de Delignières et al. (1998), les sujets n'ont pas dépassé leurs coordinations spontanées même après 80 essais. Ceci souligne la forte persistance et la forte stabilité de ces coordinations préférentielles, et renforce l'idée qu'il est impossible de

s'intéresser au processus d'apprentissage en les niant, mais qu'elles en sont bien au contraire la base.

L'identification des modes de coordination spontanées, et plus généralement l'identification des principes généraux qui les définissent, constitue un enjeu fondamental pour l'approche dynamique de l'apprentissage (Zanone & Kelso, 1992). Théoriquement, il faut surtout poser la question de leur rôle dans le processus d'apprentissage. Celles-ci ont souvent été vues comme un obstacle, de « mauvaises habitudes » dont il fallait se débarrasser pour permettre l'émergence de nouvelles réponses (Walter & Swinnen, 1994). Dans l'optique esquissée, ces premières coordinations semblent surtout constituer le point de départ de l'exploration de l'espace perceptivo-moteur, une première zone de (relative) stabilité qui pourrait constituer une sorte de tête de pont, un point d'appui pour l'exploration ultérieure.

### 2.2.2 Navigation dans l'espace de travail perceptivo-moteur

Dans ce contexte, l'évolution de ces coordinations spontanées est conçue comme la recherche de la solution optimale dans un espace de travail perceptivo-moteur (Fowler & Turvey, 1978; Newell, Kugler, Van Emmerik, & McDonald, 1989). Cet espace représente une interface hypothétique entre perception (i.e. flux informationnel) et action (i.e. flux cinétique), et se trouve déterminé par les interactions entre l'ensemble des contraintes pesant sur le système (Shaw & Alley, 1985). L'information guidant l'assemblage de la structure coordinative peut être découverte par l'exploration des différentes régions de l'espace de travail. Le paysage formé comprend différents gradients qui peuvent constituer des points d'équilibre ou régions attractives. Leur exploration donne des informations sur la manière d'organiser les degrés de liberté disponibles pour créer un dispositif de mouvement spécifique à la tâche qui soit efficient. Ces régions attractives attirent les trajectoires passant à proximité, simplifiant ainsi le problème de contrôle par la réduction des degrés de liberté du système (Kay, 1988). Cela correspond par exemple aux modes de coordination préférentielles, situés dans une région attractive dont les sujets ont du mal à sortir.

Le but de tout apprentissage consistera alors à trouver la région optimale de cet espace de travail, caractérisée par une coordination efficiente (Sparrow, 1983; Sparrow & Irizarry-Lopez, 1987) et stable (Darling & Cooke, 1987; Higgins & Spaeth, 1972; Zanone

& Kelso, 1992). Ici, la pratique va permettre aux sujets de répéter le processus d'exploration canalisé par les contraintes qui vont réduire les possibilités d'action. Lors de ces répétitions, la coordination va être modifiée, permettant en retour d'incorporer de nouvelles contraintes c'est-à-dire de modifier la relation entre variables cinétiques et variables informationnelles. L'espace de travail perceptivo-moteur évolue donc qualitativement avec la pratique puisque la découverte d'une première solution permet d'enrichir l'ensemble des contraintes et de relancer le processus d'exploration.

Ce principe d'exploration a été mis en avant notamment dans des expérimentations sur le simulateur de ski, devenu un véritable paradigme pour l'étude de l'apprentissage des habiletés complexes (den Brinker et al., 1985; Van Emmerik et al., 1989; Vereijken, 1991; Vereijken, Van Emmerik, Bongardt, Beek, & Newell, 1997; Whiting, Vogt, & Vereijken, 1992). Durand et al. (1994) ont montré par exemple que l'efficacité énergétique augmentait clairement au cours des sessions, et que les fréquences de mouvement utilisées par les sujets convergeaient toutes vers la même fréquence. De plus, Geoffroi, Delignières et Durand (1995) ont observé que cette convergence progressive vers une solution commune était réalisée par des cheminements différenciés dans l'espace de travail. Enfin, Delignières, Geoffroi, Nourrit et Durand (1996) ont expliqué que cette canalisation du comportement menait à l'adoption de la fréquence de résonance du système, caractérisée par un optimum énergétique. Nourrit, Deschamps, Lauriot, Caillou et Delignières (2000) vont plus loin sur le même type de tâche en montrant que la consistance inter et intra-individuelle de la fréquence d'oscillation est liée à l'amplitude des mouvements réalisés. Cela suggère que l'évolution des contraintes d'amplitude tend à canaliser la recherche de la solution optimale dans l'espace de travail perceptivo-moteur. Ceci n'est qu'un exemple, mais il permet de comprendre comment l'évolution des contraintes engendre et canalise une exploration dynamique de l'espace de travail.

Ici le haut niveau de contraintes tend à guider le comportement vers la solution optimale, en facilitant le processus de recherche de celle-ci. Cela sous-entendrait que des sujets confrontés à un haut niveau de contraintes n'auraient pas besoin de développer de grandes stratégies pour découvrir la solution optimale (Davids, Handford, & Williams, 1994). A l'inverse, un faible niveau de contraintes peut obliger les sujets à développer des stratégies plus sophistiquées. Gel'fand et Tsetlin (1962) sont les premiers à proposer différentes stratégies de recherche à l'intérieur de l'espace de travail, en assimilant la recherche de régions stables à celle d'un potentiel minimum dans un système biologique complexe. Pour l'essentiel, les auteurs proposent trois types de stratégies de recherches. La

première correspond aux stratégies aveugles, où tous les points de l'espace vont être explorés dans un ordre particulier ou randomisé. La stratégie locale correspond, elle, à une recherche continue où l'exploration au temps  $t$  dépend du point exploré au temps  $t-1$ . Enfin la troisième catégorie correspond aux stratégies non-locales, caractérisées par un mouvement non continu dans l'espace de travail : un point est choisi au hasard, une recherche locale en découle, puis un nouveau point est choisi au hasard, ect... D'après ces auteurs, cette dernière stratégie serait la plus efficace pour les mouvements complexes puisque les points explorés sont gardés en mémoire permettant une extrapolation pour aller se fixer ailleurs dans l'espace de travail. Cette stratégie combine ainsi les points positifs des deux méthodes précédentes.

Mais cette construction de l'espace de travail n'est pas toujours simple à réaliser. En effet, l'utilisation de ce concept est limitée par la difficulté à définir les variables pertinentes qui vont le constituer dès lors que qu'il s'agit d'habiletés complexes. Il est donc difficile de caractériser son organisation topologique et ses régions attractives, d'autant plus qu'il évolue en permanence, tant au niveau qualitatif que quantitatif, en fonction des explorations du sujet, ou des changements critiques dans l'environnement. Les régions attractives et répellantes de cet espace de travail peuvent donc évoluer, et de ce fait, sont difficiles à identifier.

Néanmoins, dans le contexte de l'acquisition motrice, l'exploration de l'espace de travail joue un rôle essentiel pour l'apprenant qui va pouvoir découvrir non seulement quelles variables pertinentes sont nécessaires à inclure dans la structure coordinative, mais aussi les valeurs assignables à ces variables. De plus, certaines tâches ont un espace de travail prédéfini qui ne peut pas être modifié ou influencé par les actions du participant. Cela permet alors d'utiliser un espace de travail stationnaire plus aisé à définir (Newell et al., 1989; Newell, Mc Donald, & Kugler, 1991).

Avec une conception relativement similaire, l'approche dynamique offre un cadre adéquat pour capturer les régions stables puisqu'elle propose des outils capables d'identifier la dynamique intrinsèque sous-tendant la performance pour une tâche donnée. En définissant le patron à apprendre comme étant la dynamique extrinsèque, ces deux dynamiques sont alors comparables, ce qui permet de voir si elles entrent en coopération ou en compétition. En fonction de la situation, il est possible que les stratégies d'explorations divergent. A partir de là, la transition entre le premier état stable et le dernier peut être modélisé (Schöner & Kelso, 1988a; Zanone & Kelso, 1992). Cependant,

identifier la dynamique intrinsèque peut se révéler être un problème non trivial, surtout lorsque les sujets novices sont en état de « désordre » lors des premiers essais.

Ici encore, toute la complexité du comportement humain s'exprime, rendant difficile la généralisation de ces divers concepts à tout type de tâche. Néanmoins, ils s'avèrent extrêmement précieux dans la lecture qu'ils peuvent apporter sur le processus d'apprentissage.

### 2.3 Nature du chemin d'accès

L'identification des modes de coordination spontanées et plus généralement l'identification des principes généraux présidant leur définition, constitue un enjeu fondamental pour l'approche dynamique de l'apprentissage (Zanone & Kelso, 1992). En effet, elle permet de déterminer les états du système ou les régions de l'espace de travail qui seront préférentiellement adoptés, ainsi que ceux qui seront a priori difficile d'accès de part leur faible stabilité intrinsèque.

Ainsi, lorsque le sujet est confronté à une nouvelle tâche, il est possible que le patron à apprendre s'inscrive dans la gamme des comportements préférentiels. Dans ce cas, il s'agit de situation de coopération, où l'apprentissage consiste à optimiser une coordination déjà existante. A l'inverse, le patron à apprendre peut entrer en compétition avec la dynamique intrinsèque puisque le comportement à apprendre correspond à un patron a priori instable. Ici, l'apprentissage devra contraindre les coordinations spontanées pour installer une nouvelle zone de stabilité dans la dynamique du système (Zanone & Kelso, 1992) : une nouvelle région accessible dans l'espace de travail.

Ainsi dans la situation de convergence, la dynamique intrinsèque représente une ressource essentielle pour l'action alors que dans une situation de compétition, elle semble représenter une contrainte dont il faudra s'émanciper pour envisager l'adoption d'un nouveau type de comportement (Nourrit, 2000).

#### 2.3.1 Situation de convergence

Dans ce cas, la tâche supporte un patron directement accessible mais de faible stabilité intrinsèque. Cela signifie que la coordination optimale se situe dans la même région de

l'espace de travail que la coordination préférentielle. L'apprentissage consiste alors à faire dériver la coordination débutante vers la coordination experte.

Zanone et Kelso (1997) ont illustré ce principe en demandant à des sujets tristables au départ (i.e. capables de réaliser du  $0^\circ$ , du  $180^\circ$  et du  $90^\circ$ ) de produire une coordination bimanuelle de  $135^\circ$  de phase relative. Pour ce faire, les sujets devaient synchroniser les flexions maximales des doigts avec les diodes correspondantes. En comparant les résultats des scanning avant, pendant et après la pratique, ils ont observé une dérive de la phase relative vers la phase relative demandée ( $135^\circ$ ). Après apprentissage, le mode de coordination à  $90^\circ$  de PR n'était plus préférentiel, remplacé par le mode à  $135^\circ$ . Ici, l'apprentissage modifie les coordinations préexistantes dans la direction du patron à apprendre. La dynamique intrinsèque est donc totalement modifiée avec l'apprentissage : certains patrons sont stabilisés et d'autres, initialement présents, sont déstabilisés. De plus, ils montrent que les patrons symétriques à ceux appris sont stabilisés sans jamais avoir été répétés.

Ainsi, apprendre engendre une modification de toute la dynamique intrinsèque, et non pas uniquement l'adoption d'une nouvelle coordination. Les concepts de dynamique intrinsèque et de modes de coordination exécutés prennent alors une dimension essentielle (Walter, 1998).

De plus, il existe dans ce cas une solution de continuité pour arriver à la coordination optimale. Si cette expérience est replacée dans l'espace de travail perceptivo-moteur, cela pourrait signifier que le sujet se situe directement dans la région de la coordination optimale et qu'il s'en approche en utilisant une stratégie de recherche locale. Ce résultat a été observé dans d'autres études (Kelso & Zanone, 2002; Zanone & Kelso, 1992), et se traduit toujours par un ajustement quantitatif de la coordination produite.

Ceci soulève une question : s'agit-il dans ce cas dans une réelle situation d'apprentissage ? Le fait que l'apprenant soit déjà capable de produire une coordination proche de celle requise laisserait à penser que ce cas se rapproche plus d'une adaptation de la coordination que d'un réel apprentissage. Cependant, il est possible que cette phase d'adaptation renvoie aux dernières étapes de l'apprentissage où le sujet cherche à affiner sa coordination pour la rendre la plus stable et la plus efficiente possible. Il semble donc pertinent, si nous voulons nous intéresser à la nature du processus dans sa globalité, de nous focaliser sur les situations de compétition où le patron à apprendre est suffisamment différent de la dynamique intrinsèque.

### 2.3.2 Situation de compétition

La situation de compétition est présente lorsque la coordination requise est qualitativement différente des coordinations préférentielles. Il s'agit de situations courantes dans le processus d'acquisition d'habiletés complexes, lors desquelles les débutants adoptent une coordination très différente de celle des experts. Arutyunyan, Gurfinkel et Mirskii (1968, 1969) sont parmi les premiers à avoir montré cette différence qualitative dans une tâche de tir au pistolet. Ces auteurs montrent que les débutants rigidifient les articulations du bras pour en faire un seul segment rigide alors que les experts compensent les mouvements des diverses articulations du bras pour minimiser la variabilité du mouvement du pistolet. Temprado et al. (1997) observent également cette différence qualitative expert/novice sur les mouvements du bras au service en volley-ball. Plus exactement, les débutants couplent toutes leurs articulations (épaule, coude et poignet) en phase pour en faire une seule unité rigide. À l'inverse, le bras de l'expert est divisé en deux segments, l'épaule et le coude évoluant en phase, tout comme le coude et le poignet. Par contre, l'épaule et le poignet ont une relation en anti-phase, leur permettant d'augmenter la précision de leur service. Ces expériences, comme celles de Delignières et al. (1998), prouvent la nécessité, à un moment donné de l'apprentissage, de modifier qualitativement la coordination du débutant (ou coordination spontanée) pour accéder à l'expertise.

Cependant ces études ne disent rien sur la nature de cette modification, si ce n'est que l'apprenant va devoir rendre accessible au moins une autre région de l'espace de travail, ce qui suppose une évolution dynamique de celui-ci.

La première hypothèse sur la nature de cette modification a été émise par Schöner (1990) et par Schöner et Kelso (1988b). Ils postulent que si l'information comportementale (patron requis) rentre en conflit avec la dynamique intrinsèque, alors une transition de phase est attendue en direction du patron requis. Zanone et Kelso (1992), en demandant à des sujets initialement bistables (capables de produire des PR à 0° et à 180°) d'apprendre une PR à 90°, montrent que les sujets produisent d'abord une coordination à 180° puis finissent par stabiliser le 90°, alors que le 180° va être temporairement déstabilisé. Cette altération qualitative du paysage des attracteurs est considérée comme la signature d'un processus de transition. Ici, l'apprentissage moteur va être envisagé sous forme de bifurcation abrupte c'est-à-dire comme un processus transitionnel entre des modes de coordination initiaux et d'autres patrons plus efficaces et efficaces (Zanone & Kelso, 1994).

Cependant, il semble nécessaire d'apporter quelques nuances à ces résultats avant de généraliser cette hypothèse à tout apprentissage. En effet, comme le montrent Hong et Newell (2005), les contraintes de la tâche, en conjonction avec celles de l'environnement et de l'organisme, guident significativement l'organisation du mouvement et ses changements à travers le temps. Cela signifie que l'évolution du comportement est dépendante notamment de la nature de la tâche. Or dans les expérimentations sur les coordinations bimanuelles, les tâches proposées sont toutes de nature morphocinétique, dans lesquelles le but est la reproduction d'une configuration spatio-temporelle. Cependant, mis à part quelques activités physiques comme la danse et la gymnastique, la plupart des habiletés requises sont à contrario de nature topocinétique, lors desquelles l'atteinte du but constitue la finalité, indépendamment du patron produit. Donc tous les résultats, issus d'expériences fixant comme objectif la reproduction d'un patron particulier, doivent être testés sur des tâches topocinétiques avant de pouvoir être généralisés. Il semble en effet que le chemin d'accès à l'expertise puisse varier si dès le départ la solution motrice est donnée au sujet ou si s'il doit trouver seul celle qui lui permettra au mieux d'atteindre le but demandé. De plus, ces études sur l'apprentissage d'une nouvelle phase relative entre deux membres ne permettent qu'une faible adaptabilité et une dégénérescence limitée (au niveau des degrés de liberté). Par contre, ces expérimentations facilitent l'analyse de la dynamique du système puisqu'en s'affranchissant de contraintes physiques telles que la gravité, elles permettent une formalisation mathématique précise du comportement. Enfin, lors de ces diverses études (Kelso & Zanone, 2002; Zanone & Kelso, 1992, 1997), l'évolution de la phase relative n'est pas regardée en continu. L'hypothèse d'une transition abrupte repose sur la comparaison des scannings réalisés à différents moments du processus. Au vu de ces différentes remarques, il semble primordial de rappeler que les résultats obtenus sont toujours extrêmement dépendant de la tâche, et qu'il est donc nécessaire de tester la validité d'une théorie sur des tâches variées avant de pouvoir la généraliser (Wulf & Shea, 2002).

Mais que cela soit dans une tâche morphocinétique ou topocinétique, mettant en jeu quelques degrés de liberté biomécaniques ou tout le corps, l'apprentissage en situation de compétition reste bien un problème de transition entre le patron débutant et le patron expert. Par contre, la question de la nature de cette transition reste en suspend : le caractère abrupt décrit précédemment existe-t-il vraiment ? Peut-il vraiment être généralisé ou est-il dépendant de la tâche proposée ? Est-il imaginable que lorsque tout le corps est en mouvement le sujet bascule instantanément sur le comportement expert ?

Sur un autre niveau d'analyse (celui du comportement résultant), Nourrit, Delignières, Caillou, Deschamps et Lauriot (2003) dans une étude sur simulateur de ski, ont tenté de mettre en évidence et de décrire la (les) transition (s) de phase caractérisant l'apprentissage d'une habileté complexe grâce à un suivi longitudinal de l'évolution de la coordination. Le but de l'expérience était d'analyser l'évolution du comportement dans une tâche complexe (simulateur transformé en mono-ski), sur un terme suffisamment long (13 semaines de pratique). Leurs analyses portaient tout d'abord sur la modélisation de la dynamique du déplacement de la plateforme du simulateur, mais aussi sur l'analyse du décalage de phase entre les mouvements de la plateforme et les oscillations du centre de gravité. Ils ont posé l'hypothèse qu'à chaque modèle dynamique correspondrait une stratégie différente en terme de décalage de phase. Au niveau de la dynamique de la plateforme, l'analyse de la fonction d'amortissement révèle un amortissement de type Rayleigh au début de l'apprentissage. Ce type d'amortissement est caractérisé par un pic de vitesse intervenant dans la première partie de la trajectoire d'un point de revirement à l'autre. De ce fait, la seconde partie de la trajectoire se déroule sur un temps plus long, ce qui permettrait aux participants d'avoir plus de temps dans la phase finale pour gérer le revirement du mouvement. Après 150 essais tous adoptent une fonction d'amortissement de type van der Pol, caractérisé notamment par l'atteinte des pics de vitesse dans la seconde moitié de la trajectoire. Les auteurs expliquent que le passage de l'un à l'autre est dû au fait que lorsque les sujets vont mieux gérer les points de revirement, ils n'auront plus besoin de ralentir à cet endroit. De ce fait, la fréquence de mouvement va augmenter. Or avec le modèle de type Rayleigh, un accroissement de fréquence tend à réduire l'amplitude. Le modèle van der Pol, quant à lui, n'est pas affecté par l'augmentation de la fréquence puisque avec ce type d'oscillateur, fréquence et amplitude sont indépendantes. Pour maintenir une certaine amplitude de mouvement les sujets sont donc poussés à adopter un modèle de type van der Pol.

L'intérêt fondamental de ce travail est qu'il est un des rares, voire l'unique, à observer essais par essais l'évolution du comportement ce qui le rend susceptible de mettre à jour la nature du processus d'apprentissage. L'originalité de ce travail est qu'il révèle une transition caractérisée par une phase de bi-stabilité où les modèles de type Rayleigh et van der Pol sont utilisés en alternance d'un cycle à l'autre. De plus, durant cette période d'alternance, les coefficients des modèles ont des valeurs plus faibles que lorsque les sujets exploitent uniquement l'un ou l'autre. Ces résultats sont typiques d'un régime bi-stable, au

niveau duquel les deux attracteurs semblent disponibles mais sans grande stabilité intrinsèque.

Au niveau de la phase relative, leur étude montre que lorsque les sujets produisent uniquement un modèle de type Rayleigh, ils adoptent un rapport de fréquence de 2 :1 entre les mouvements de forçage et les déplacements du chariot, avec des décalages de phase moyens de 61° et 210°. En d'autres termes, les sujets initient le forçage avant le passage en verticale basse, dans la première moitié de la trajectoire. A la fin de l'expérimentation, quand tous adoptent un modèle d'amortissement de type van der Pol, les décalages de phases moyens sont de 95° et 239°. Quand les sujets partent vers la droite (ce qui correspond au 95°), ils initient le mouvement au début de la seconde partie de la trajectoire et se rapprochent de celle-ci dans le mouvement en sens inverse. Même si une asymétrie est présente (liée peut-être à une asymétrie fonctionnelle, à une stratégie non définitive pour le déplacement vers la gauche, ou encore à un problème de moyenne de cycle et de demi-cycle), la W-method de Beek et Beek (1988), permettant d'observer l'ensemble des composantes du modèle dynamique qui écartent le système d'un mouvement purement harmonique, permet de prédire les initiations de mouvement relevées ici grâce au décalage de phase.

Les conclusions originales de ce travail reposent sur deux points essentiels. Premièrement, cette étude, contrairement aux prédictions de Bernstein (1967) et aux résultats de Vereijken (1991), ne montre pas d'adoption d'un comportement intermédiaire entre le comportement débutant et le comportement expert. Deuxièmement, ces résultats révèlent l'existence d'une phase d'alternance cycle-à-cycle entre ces deux comportements, remettant en question le caractère abrupt de la transition lors de l'apprentissage. Deux hypothèses sont d'ailleurs émises par les auteurs. S'il existe une continuité entre l'amortissement de type Rayleigh et l'amortissement de type van der Pol, sous la forme d'un modèle hybride contenant ces deux termes (voir Kay et al., 1987), alors l'évolution du comportement peut être vue comme une évolution paramétrique (progressive) de ce modèle. Mottet et Bootsma (1999) ont d'ailleurs montré, lors d'analyses de la tâche de Fitts, que le terme Rayleigh de ce modèle était prédominant lorsque l'indice de difficulté de la tâche était élevé ce qui pourrait expliquer l'adoption chez le débutant de ce même comportement auquel succède le comportement van der Pol, utilisé lorsque l'indice de difficulté est faible. Cependant, le fait qu'aucune trace du terme van der Pol ne soit relevée lors des premières sessions caractérisée par le terme de Rayleigh (inversement, aucune trace du comportement Rayleigh n'apparaît en fin d'apprentissage), ajouté aux mauvais

résultats obtenus lors de tests sur ce modèle hybride par régression multiple, amène les auteurs à poser une autre hypothèse. L'observation d'une transition progressive d'un régime mono-stable (Rayleigh) à un autre régime mono-stable (van der Pol), par l'intermédiaire d'un régime bistable, laisse supposer la présence d'une bifurcation de type *saddle-node*, modèle utilisé par ailleurs (Diedrich & Warren, 1995) pour rendre compte de la transition marche-course (voir figure 5). La seule différence repose sur l'évolution du paramètre de contrôle. Celui-ci, représenté par l'augmentation de la vitesse de locomotion admet une évolution linéaire et continue lors de l'expérience de Diedrich et Warren (1995) ce qui engendre une transition abrupte. Par contre, si l'évolution de ce même paramètre de contrôle est conçue comme non linéaire et qu'il stationne aux alentours de sa valeur critique, alors un régime bistable peut apparaître pendant un temps plus ou moins long avec une alternance entre les deux solutions stables, due à la présence de forces stochastiques dans le système. Les résultats de l'expérience de Nourrit et al. (2003) semblent concorder avec cette hypothèse si l'on admet qu'il existe une différence qualitative entre le comportement de type Rayleigh et de type van der Pol.

Il est cependant difficile de conclure sur la nature continue ou discontinue de la transition observée dans cette étude. En effet, en se référant à l'analyse du paramètre d'ordre (i.e. le moment de forçage ou phase relative), on voit que les sujets adoptent déjà un rapport de fréquence de 2 :1 lorsqu'ils produisent un amortissement de type Rayleigh. La seule différence relevée est au niveau du moment de forçage : quand les sujets partent vers la droite, ils initient le forçage après le passage en verticale basse lorsqu'ils produisent un comportement de type van der Pol, alors qu'ils forcent avant le passage en verticale basse lorsqu'ils produisent un amortissement de type Rayleigh. Il faut cependant noter que les premières données sur le forçage font déjà référence à la troisième session, ce qui ne permet pas de savoir s'il y a une évolution du décalage de phase auparavant. Il semble donc difficile de conclure définitivement sur le choix d'une des deux hypothèses au vu des résultats de cette expérience.

Cependant, cette bifurcation de type *saddle-node* semble apporter une hypothèse assez puissante sur la nature de la transition lors de l'apprentissage d'habiletés complexes. Elle a l'avantage de pouvoir ou non présenter un caractère abrupte, ce qui est non négligeable. En effet, en se référant à la transition marche-course, la transition abrupte a du sens puisqu'elle s'opère entre deux patrons préexistants dans le répertoire du sujet. Par contre, dans le cas de l'apprentissage moteur, seul le patron débutant est adoptable au départ. La vision d'une transition abrupte correspondrait à une sorte d'insight où le sujet

adopterait à un moment donné la coordination experte pour ne plus la quitter. Or un tel phénomène est rarement observé dans l'acquisition d'habiletés complexes : le patron à apprendre n'est pas directement disponible et doit être construit durant la transition. En ce sens, la transition de type *saddle-node* admettant des phases d'alternance entre la coordination experte et débutante permettrait cette phase de construction nécessaire dans bon nombre d'habiletés complexes.

De plus, cette hypothèse est renforcée par les travaux de Jeka et al. (1993) et de Kelso et Jeka (1992), qui prédisent que lorsque la symétrie est rompue, ce qui est le cas dans l'expérience que nous venons de décrire et dans la plupart des habiletés motrices, alors la transition attendue ne sera pas en fourche mais en nœud-col (ou *saddle-node*). De même, Van Emmerik et Wagenaar (1996), en se basant sur le modèle de la quadrupédie de Schöner, Jiang et Kelso (1990), également utilisé par Jeka et Kelso, montrent sur une expérience de locomotion sur tapis roulant, qu'il existe un changement plus ou moins graduel au niveau de la phase relative entre le thorax et le pelvis, avec une perte de stabilité pour des vitesses de déplacement intermédiaires, mais aussi des changements graduels avec une multistabilité sans perte de stabilité au niveau du patron. Ceci corroborerait l'hypothèse émise par Nourrit et al. (2003) sur l'existence d'une phase de bi-stabilité entraînant une transition plutôt graduelle.

Cette transition graduelle est aussi observée à un autre niveau par Haibach, Daniels et Newell (2004) lors de l'apprentissage du jonglage avec trois balles. Ils observent au niveau de la performance, c'est-à-dire au niveau du nombre de balles attrapées, que la transition la plus longue se fait entre le rattrapage de la 3<sup>ème</sup> à la 4<sup>ème</sup> balle. Or cela correspond à la plus grande réorganisation qualitative, puisque la main non dominante va devoir assumer le patron initié par la main dominante en gardant le mouvement orienté dans le même sens ce qui rompt la symétrie. Les résultats montrent que les sujets transitent en une seule session pour passer de la 1<sup>ère</sup> à la 2<sup>ème</sup> balle attrapée, et de la 2<sup>ème</sup> à la 3<sup>ème</sup>. Par contre le passage entre la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> balle prend en fonction des sujets de 1 à 5 sessions montrant là encore, la possibilité d'une transition graduelle lors d'une réorganisation qualitative nécessaire à l'adoption du comportement expert.

Ces différents travaux permettent d'entrevoir l'apprentissage d'habiletés complexes comme une transition de type *saddle-node*. Cependant, aucune de ces expériences n'a réellement permis de tester cette hypothèse. Pour cela, il semble nécessaire : (i) de créer une tâche impliquant une discontinuité obligatoire entre le comportement débutant et le

comportement expert au niveau des coordinations, autrement dit créer une situation de compétition certaine ; (ii) de travailler sur une tâche impliquant l'ensemble du corps ayant comme objectif l'atteinte d'un but et non la reproduction d'un patron ; (iii) de mener un apprentissage exploratoire, uniquement guidé par le but de la tâche, afin de ne pas interférer la nature du processus ; et enfin (iv) d'avoir en plus des données de performance, une analyse qualitative du comportement, basée sur l'évolution cycle-à-cycle, essais par essais, des coordinations afin d'obtenir l'évolution brute du comportement permettant l'observation de la transition.

Suivant cette logique, ce travail a cherché à révéler et à comprendre la nature de l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'une habileté complexe. La compréhension de cette transition nous a semblé fondamentale pour appréhender la nature du lien entre les coordinations débutantes et les coordinations expertes, lien méconnu mais pourtant inhérent à l'intérêt porté aux diverses conditions d'apprentissage.

Notre travail a été réalisé en quatre temps. Lors de notre première étude, nous nous sommes attachés à vérifier s'il était possible de répliquer sur un simulateur de ski classique les résultats obtenus par Nourrit et al. (2003). Il s'agissait notamment de vérifier si lors des premiers essais un amortissement Rayleigh était bien retrouvé et si les sujets adoptaient un amortissement van der Pol lors d'un stade plus avancé de l'apprentissage. Il s'agissait surtout de voir l'effet de la difficulté de la tâche (le simulateur classique étant beaucoup plus aisé que la version monoski utilisée par Nourrit), sur la durée de la phase de transition.

Dans un second temps, nous avons cherché à dépasser l'ambiguïté issue de l'expérience de Nourrit et al. (2003) liée à la possible continuité entre coordinations initiale et experte. Pour ce faire, nous avons créé des tâches expérimentales supposant nécessairement une discontinuité, le comportement du débutant exploitant a priori un rapport de fréquence différent de celui de l'expert. Un premier travail a porté sur une balançoire expérimentale et un second sur les barres parallèles, reprenant en cela la situation proposée par Delignières et al. (1998) mais avec un aménagement permettant une durée de pratique plus conséquente. L'objectif de ces deux expérimentations était d'analyser finement la transition et de tester la pertinence de l'hypothèse d'alternance.

Enfin, dans une dernière étude, nous avons à nouveau exploité la balançoire expérimentale afin d'analyser l'effet d'une modification des contraintes de la tâche sur l'émergence des coordinations et sur l'exploration de l'espace de travail.

---

*Chapitre II : Nature de la transition du mouvement résultant**Expérience 1***1. Introduction**

D'un point de vue dynamique, le comportement initial du débutant dans une tâche nouvelle est conçu comme l'expression de la dynamique intrinsèque du système (Delignières et al., 1998; Zanone & Kelso, 1992). Les tendances spontanées de coordination du système déterminent des états attracteurs, qui contraignent fortement l'émergence du comportement. Cette influence de la dynamique intrinsèque a été largement étudiée dans le cadre des coordinations bimanuelles (Kelso, 1984, 1995). Ces coordinations font apparaître seulement deux états stables : le patron en phase, lorsque les deux mains ont des mouvements symétriques dans des directions opposées, avec une activation simultanée des muscles homologues, et le patron en anti-phase, durant lequel les segments sont mobilisés dans des directions similaires, avec une activité simultanée des muscles non-homologues. La dynamique intrinsèque du système, lorsqu'il est confronté à cette tâche d'oscillation bimanuelle, détermine une attraction forte vers ces deux patterns, et des sujets novices rencontrent des difficultés à réaliser d'autres relations de phase entre leurs mains (Zanone & Kelso, 1992). Ainsi, l'apprentissage repose fréquemment sur le dépassement des tendances spontanées de coordination et dans l'installation et la stabilisation d'un patron nouveau, et qualitativement distinct. L'apprentissage est alors caractérisé par une modification qualitative du mode de coordination, et peut être conçu comme un processus de bifurcation, entre le comportement initial et la solution expert (Zanone & Kelso, 1992).

Vereijken (1991) a observé les réorganisations qualitatives du comportement durant l'apprentissage sur un simulateur de ski, et a décrit l'acquisition de l'habileté comme la succession de trois étapes distinctes, caractérisées par différents modèles mécaniques. Plus précisément, elle décrit le comportement du débutant comme un pendule inversé, durant les premiers essais sur la tâche, un pendule simple (comme le pendule d'une horloge) durant une étape plus avancée, et finalement comme un pendule composite articulé (incorporant des degrés de liberté additionnels, et notamment les genoux et les hanches) durant l'étape experte. Cette évolution a été interprétée par l'auteur sur la base des hypothèses de Bernstein (1967) sur l'apprentissage, avec un gel initial des degrés de liberté, puis leur libération progressive et leur intégration dans une structure coordinative permettant une exploitation efficiente des propriétés mécaniques de la tâche.

Cette première approche, cependant, reste qualitative et ne permet pas une analyse de la transition d'un mode de coordination à l'autre durant l'apprentissage. Dans une série d'expériences, Delignières, Nourrit et collaborateurs ont tenté de développer une nouvelle méthode pour évaluer les propriétés dynamiques du comportement de l'apprenant, et plus spécialement la manière dont il force le simulateur pour maintenir et amplifier les oscillations (Delignières et al., 1999; Nourrit et al., 2003). Ils ont utilisé la *W-method* proposée par Beek et Beek (1988) qui comprend une série d'outils graphiques et statistiques destinés à dériver un modèle dynamique à partir de données cinématiques. Dans ce cadre, les mouvements rythmiques sont modélisés en tant qu'oscillateurs obéissant à des équations différentielles de second ordre du type:

$$m\ddot{x} + g(x) + f(x, \dot{x})\dot{x} = 0, \quad (1)$$

où  $x$  représente la position. La notation pointée indique la différenciation par rapport au temps. Le premier terme représente l'inertie du système, le second la raideur, et le troisième l'amortissement. Le principal souci de cette approche est d'identifier les fonctions non-linéaires de raideur et d'amortissement qui sont exploitées pour produire le mouvement rythmique.

Dans une première expérience de Delignières et al. (1999), trois groupes de sujets ont pratiqué sur le simulateur de ski durant quatre sessions. Chaque groupe avait pour consigne d'atteindre et de maintenir une certaine amplitude d'oscillation, respectivement de 15, 22.5, et 30 cm. Les analyses ont porté sur les oscillations de la plateforme. Dans un premier temps les données ont été moyennées et normalisées au niveau de chaque groupe, selon la procédure proposée par Mottet et Bootsma (1999). Puis la *W-method* a été appliquée aux cycles normalisés obtenus. Les résultats montrent que les oscillations de la plateforme peuvent être représentées de manière adéquate par le modèle suivant :

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{21}x^2\dot{x} = 0 \quad (2)$$

qui contient une fonction non-linéaire de raideur  $g(x) = c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5$  ( $c_{30}$  étant négatif et  $c_{50}$  positif, révélant un processus complexe de mollissement/durcissement de la raideur durant l'oscillation), et une fonction d'amortissement de van der Pol  $f(x, \dot{x})\dot{x} = c_{01}\dot{x} + c_{21}x^2\dot{x}$  (à noter que dans ces équations, les coefficients sont indexé selon la notation préconisée par Beek et Beek (1988), où  $c_{ij}$  correspond au coefficient du terme  $x^i\dot{x}^j$ ).

Ces analyses ont révélé la présence de fortes non-linéarités dans la fonction de raideur. L'inclusion d'un terme cubique négatif et d'un terme quintique positif était nécessaire pour rendre compte des déviations au comportement harmonique. Des analyses plus poussées ont montré que la contribution de ces termes non-linéaires augmentait avec l'amplitude requise, et diminuait avec la pratique. À l'inverse, la fonction d'amortissement était identique d'un groupe à l'autre, et restait stable au cours de la pratique.

Cette première expérience n'a mis en évidence aucune évolution qualitative du comportement avec la pratique. En d'autres termes, et du moins dans la fenêtre temporelle d'observation, la pratique semble entraîner des changements paramétriques de la coordination, plutôt que des réorganisations qualitatives. Deux explications divergentes peuvent être évoquées : la première renvoie à une possible différence, entre les expériences de Vereijken (1991) et de Delignières *et al.* (1999), dans les capacités initiales des sujets respectifs. Dans le second travail, les sujets étaient capables dès les premiers essais d'atteindre les amplitudes requises, y compris dans les groupes "30 cm" et "22.5 cm", alors que les amplitudes initiales rapportées par Vereijken étaient voisines de 10 cm (Vereijken, 1991). Il est important de noter que les sujets de Delignières *et al.* (1999) étaient étudiants dans une Faculté des Sciences du Sport, et bien que novices sur le simulateur de ski, avaient tous une expérience antérieure en ski. De plus, il leur était accordé deux essais d'échauffement avant l'expérimentation, qui auraient pu leur permettre de résoudre rapidement les problèmes initiaux posés par la tâche. Ceci suggère que, dès le début de l'expérience proprement dite, ils auraient pu se situer au-delà du premier stade identifié par Vereijken.

Une seconde explication peut renvoyer à l'étroitesse de la fenêtre temporelle d'observation considérée dans ce travail. L'apprentissage des habiletés motrices demande un long temps de pratique (Schmidt & Lee, 2005), et dans des tâches si complexes, les transitions peuvent demander plus de temps de pratique. De ce point de vue, une période d'observation plus longue aurait été nécessaire pour obtenir une bifurcation claire dans le comportement des sujets.

Dans le but de tester ces deux hypothèses, une seconde expérience a été réalisée, avec un meilleur contrôle de la difficulté relative initiale de la tâche, et un temps de pratique beaucoup plus long (Nourrit *et al.*, 2003). Dans cette expérience, cinq sujets ont pratiqué sur le simulateur pendant 13 semaines, à raison de 3 sessions de 10 essais d'une minute (pour un total de 390 essais). Une version modifiée en monoski a été utilisée : les deux supports

indépendants pour les pieds ont été remplacés par une unique planche, articulée sur un axe sagittal. La nouvelle tâche était clairement plus difficile que la précédente, et était supposée assurer l'observation d'un comportement novice, au moins pendant les premiers essais.

La procédure de modélisation précédemment évoquée a été appliquée sur les données individuelles. Les résultats ont montré que lors des premiers essais, les sujets exploitaient un comportement d'amortissement de Rayleigh. Le modèle obtenu avait la forme suivante :

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{03}\dot{x}^3 = 0 \quad (3),$$

incluant une fonction d'amortissement de Rayleigh  $f(x, \dot{x})\dot{x} = c_{01}\dot{x} + c_{03}\dot{x}^3$ .

Plus tard dans l'expérience, une transition apparut chez tous les sujets de ce comportement Rayleigh vers un comportement van der Pol (voir Eq. 2). Cette transition n'était pas abrupte, mais était caractérisée par une assez longue période de bi-stabilité, au cours de laquelle les deux comportements d'amortissement étaient exploités en alternance au cours de chaque essai. Les auteurs ont proposé d'interpréter cette bi-stabilité transitoire comme la signature d'une bifurcation *saddle-node*. Dans de telles bifurcations, la transition du patron initial au patron final est réalisée au travers d'une étape durant laquelle les deux solutions sont simultanément disponibles. Durant cette phase de transition, les deux attracteurs présentent une stabilité moindre que durant les régimes monostables initial et final. Cette bifurcation a notamment été utilisée par Dietrich et Warren (1995) pour modéliser la transition marche-course.

Dans l'expérience de Nourrit et al (2003), cette période de transition apparaissait approximativement durant la seconde semaine de pratique (i.e. après 50 ou 60 essais), mais sa durée était très différente entre les sujets. Certains ont définitivement adopté le comportement van der Pol durant la troisième semaine, mais un des sujets n'a pu se stabiliser sur le nouveau comportement avant la dixième semaine.

Ces résultats suggèrent que le véritable comportement du débutant, durant les premiers essais, pourrait être caractérisé par l'exploitation d'un amortissement de Rayleigh. La modification de la tâche a eu pour effet de retarder l'émergence de la transition. Mais avec la version classique du simulateur cette transition devrait apparaître beaucoup plus tôt, durant les premiers essais. De ce point de vue, les sujets de l'expérience de Delignières et al.

(1999), qui exploitaient clairement un comportement de van der Pol, semblaient se situer au-delà de cette transition dès le début de l'expérimentation.

Le but de ce travail était donc de confirmer, sur le simulateur classique, (1) l'exploitation par les novices d'un amortissement de Rayleigh durant les premiers essais sur la tâche, et (2) l'apparition précoce d'une bifurcation du comportement Rayleigh au comportement van der Pol, durant les premières sessions de pratique. De plus, le coût énergétique a été mesuré au cours de l'expérience, dans le but de vérifier si la transition d'un comportement d'amortissement à un autre, durant l'apprentissage amenait une évolution notable de l'efficacité du mouvement.

## 2. Méthode

### 2.1 Participants

Trois participants (âge moyen: 22.8 ans  $\pm$  2.1, poids moyen: 71.8 kg  $\pm$  3.5 , taille moyenne: 177.6 cm  $\pm$  5.2) se sont portés volontaires pour cette expérimentation. Ces participants n'avaient aucune expérience antérieure sur le simulateur de ski, et ne pratiquaient pas par ailleurs le ski de manière régulière. Ces participants ont signé un formulaire de consentement, et n'étaient pas payés pour leur participation.

### 2.2 Tâche expérimentale

L'expérience a été réalisée sur un simulateur de ski Skier's Edge (Figure 8). Cet appareil consiste en une plateforme, équipée de roulettes, qui peut se déplacer de droite à gauche sur deux rails bombés. Deux bandes élastiques tendent à ramener la plateforme en position centrale, lorsqu'elle a été amenée préalablement vers la droite ou la gauche. La tension des bandes élastiques était contrôlée grâce à un dynamomètre au début de chaque session, et ajustée de manière à obtenir un déplacement de 4 centimètres de la plateforme à partir de la position centrale suite à l'application d'une force tangentielle de 100 Newtons. Afin de tester la dynamique intrinsèque de l'appareil, la relation entre le déplacement ( $x$ ) et la force de rappel ( $F$ ) a été analysée: dans l'étendue des amplitudes utilisées dans l'expérience présente, cette relation est apparue parfaitement linéaire ( $F=1715.9x$ ,  $r^2=0.99$ ), suggérant que les bandes élastiques se comportent comme des ressorts à raideur linéaire.

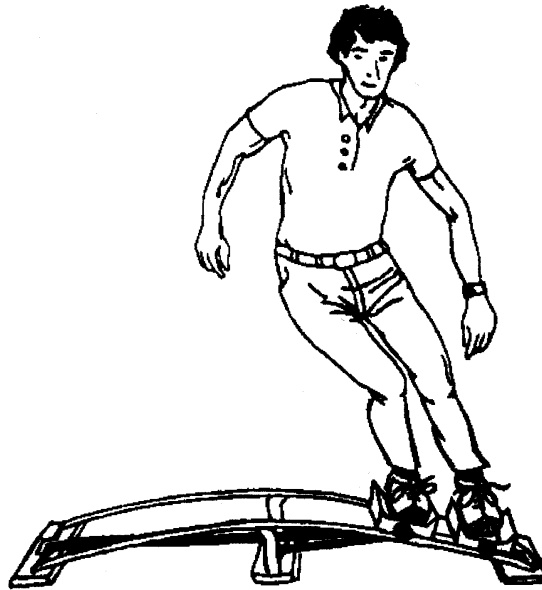


Figure 8: Le simulateur de ski.

### 2.3 Procédure

La consigne donnée aux participants était d'apprendre à réaliser sur le simulateur des oscillations les plus amples possibles. Il leur était demandé de garder leurs mains jointes dans le dos et de fixer un point positionné en face d'eux à hauteur de leurs yeux.

Six sessions de pratique ont été réalisées sur six jours consécutifs. Chaque session était composée de quatre essais de quatre minutes, séparés par un repos de quatre minutes. Les participants pratiquaient individuellement et ont en totalité réalisé 24 essais de 4 minutes.

La position du centre de la plateforme était mesurée en continu par un potentiomètre (Radiospares, résistance 20-K et linéarité .25%), et enregistrée à une fréquence de 100 Hz. Une révolution du potentiomètre correspondait à un déplacement de 12.5 cm de la plateforme. Les données ont été stockées sur un ordinateur personnel pour les traitements subséquents.

Pour chaque essai, 4 échantillons de 2000 données ont été retenus, prélevées respectivement à partir de 30 secondes, 90 secondes, 150 secondes, et 210 secondes. Pour chaque participant 60 séries sont ainsi obtenues pour l'ensemble de l'expérimentation.

Ces séries temporelles ont été dans un premier temps filtrées par un filtre de Butterworth de second ordre, avec une fréquence de coupure de 10 Hz. Cette fréquence de coupure a été choisie suite à une analyse de la composition spectrale des séries temporelles, et a été considérée comme appropriée pour préserver les caractéristiques essentielles du signal. Un algorithme de recherche de pic a été ensuite utilisé pour localiser les points de revirement du mouvement. La segmentation des échantillons a permis de calculer: (1) l'amplitude moyenne des oscillations (en cm), définie comme la moyenne des déviations maximales du chariot, de part et d'autre de la position centrale, et (2) la fréquence moyenne (en Hz), définie comme la moyenne des inverses des périodes.

Chaque échantillon a ensuite été résumé dans un cycle moyen normalisé: chaque cycle a été normalisé dans le temps sur 84 points équidistants, par une procédure d'interpolation linéaire (Nourrit et al., 2003; Mottet & Bootsma, 1999). Ces points ont été rééchantillonnés dans l'intervalle  $[-1,+1]$ , puis ces cycles normalisés ont été moyennés point par point, débouchant sur la construction d'un cycle moyen normalisé de 84 points. Les dérivées première et seconde ont été calculées à partir du cycle moyen normalisé, puis rééchantillonnées dans l'intervalle  $[-1, +1]$ . Ce cycle normalisé représente l'organisation dynamique qui émerge en réponse aux demandes de la tâche, considérant que le bruit stochastique lié aux fluctuations sur les petites échelles de temps ont été réduites par le processus de moyennage.

## 2.4 Modélisation

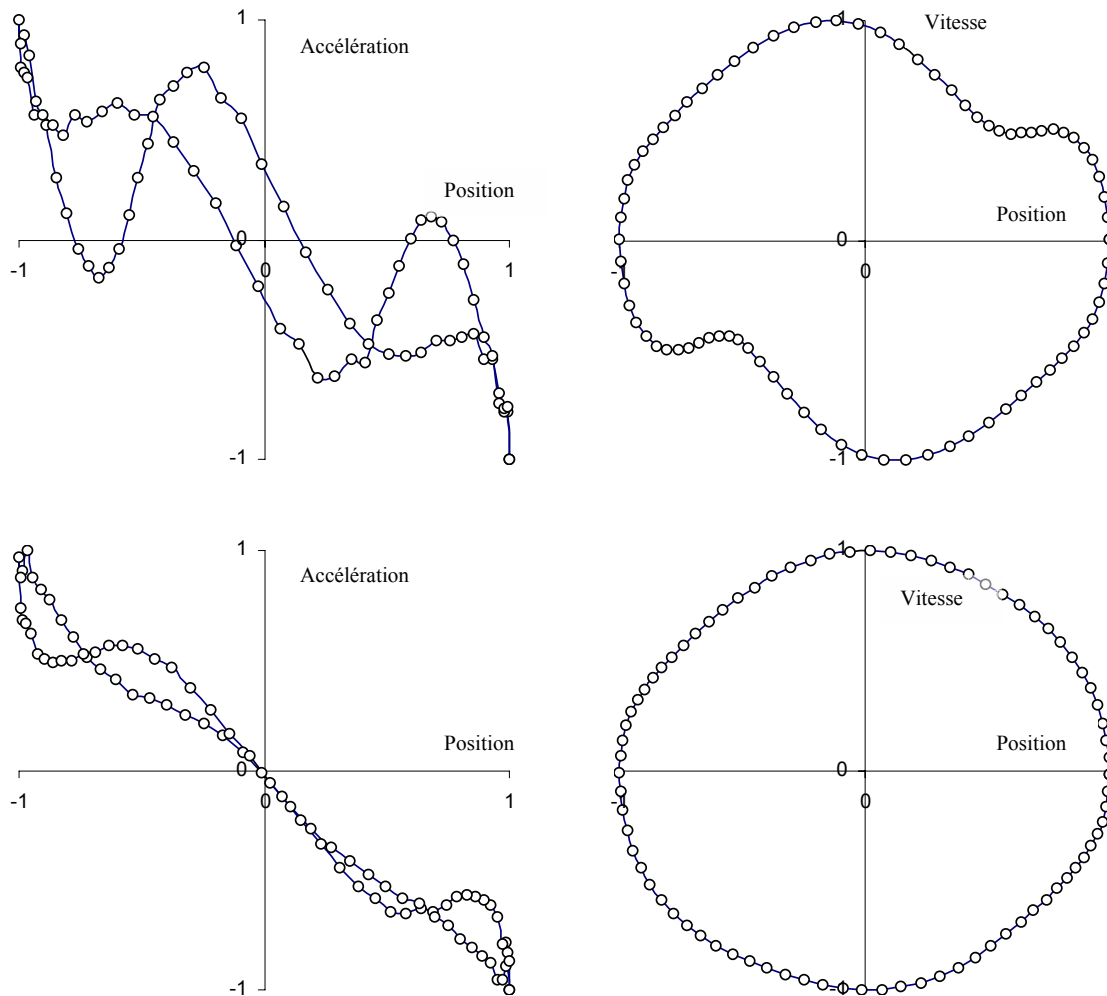
Notre stratégie de modélisation était basée sur l'analyse de ces cycles moyens. Notre méthode, en accord avec les principes développés par Beek et Beek (1988), combinait des analyses qualitatives graphiques, pour identifier les termes non-linéaires sous-tendant les mouvements de la plateforme, et des procédures statistiques quantitatives, pour estimer l'importance de la contribution respective de chaque terme, et son évolution avec la pratique.

Dans un premier temps, le portrait de Hooke (position vs. accélération, voir Figure 9) a été utilisé pour obtenir une estimation directe de la fonction de raideur (Delignieres, Nourrit, Deschamps, Lauriot, & Caillou, 1999; Guiard, 1993; Mottet & Bootsma, 1999). Le portrait de Hooke donne une ligne droite pour un oscillateur harmonique parfait, et toute déviation par rapport à la ligne droite donne des informations essentielles sur les termes non-linéaires à inclure dans le modèle. Par exemple l'obtention d'une courbe en N dans le

portrait de Hooke suggère un comportement de ressort mollissant (*softening spring*), dont on peut rendre compte en ajoutant un terme cubique négatif de Duffing ( $-x^3$ ) dans le modèle (Mottet & Bootsma, 1999). Des analyses précédentes sur le simulateur ont montré la nécessité d'ajouter un terme positif quintique ( $x^5$ ) dans la fonction de raideur, pour rendre compte d'une restauration de la raideur à l'approche des points de revirement du mouvement (voir Figure 9, et Delignières *et al.*, 1999, Fig .1, p. 775).

La détermination des termes pertinents d'amortissement non-linéaire est également basée sur des analyses graphiques. Afin d'isoler la contribution de l'amortissement non-linéaire, une régression de  $\ddot{x}$  a été réalisée contre tous les termes de raideur linéaire et non linéaires précédemment identifiés, et contre l'amortissement linéaire ( $\dot{x}$ ). Les résidus (RES) de cette régression sont supposés refléter la contribution des termes d'amortissement non-linéaires dans le comportement. Ensuite les principes proposés par Beek et Beek (1988) ont été appliqués: la présence de comportement van der Pol a été testée en représentant les valeurs de  $\text{RES}/\dot{x}$  en fonction de  $x$  (dans ce cas une parabole est attendue, révélant la présence d'un terme en  $x^2\dot{x}$  dans les résidus), et la présence de comportement Rayleigh en représentant les valeurs de RES en fonction de  $\dot{x}$  (attendant une courbe en N, révélant la présence d'un terme en  $\dot{x}^3$  dans les résidus ; pour des exemples graphiques, voir Nourrit *et al.*, 2003, Fig. 6, p. 159).

Le but de ces analyses graphiques était de déterminer un modèle dynamique minimum, contenant un ensemble limité de termes pertinents. Puis l'importance relative de chaque coefficient a été estimée par une régression multiple prédisant  $\ddot{x}$  en fonction de tous les termes retenus dans le modèle, comme suggéré par la méthode originale de Beek et Beek, 1988.



**Figure 9:** Exemples représentatifs de portraits de Hooke (accélération vs position, colonne de gauche) et de portraits de phase (vitesse vs position, colonne de droite). Les deux portraits du haut correspondent au comportement observé au début de la pratique (Participant 2, session 1, essai 1, échantillon 3), et ceux du bas au comportement du même participant, plus tard dans la pratique (session 5, essai 1, échantillon 3). Les portraits de Hooke illustrent clairement les non-linéarités initiales de la fonction de raideur, et sa linéarisation avec la pratique. L'évolution des portraits de phase reflète le passage d'un amortissement de Rayleigh à un amortissement van der Pol.

## 2.5 Données physiologiques

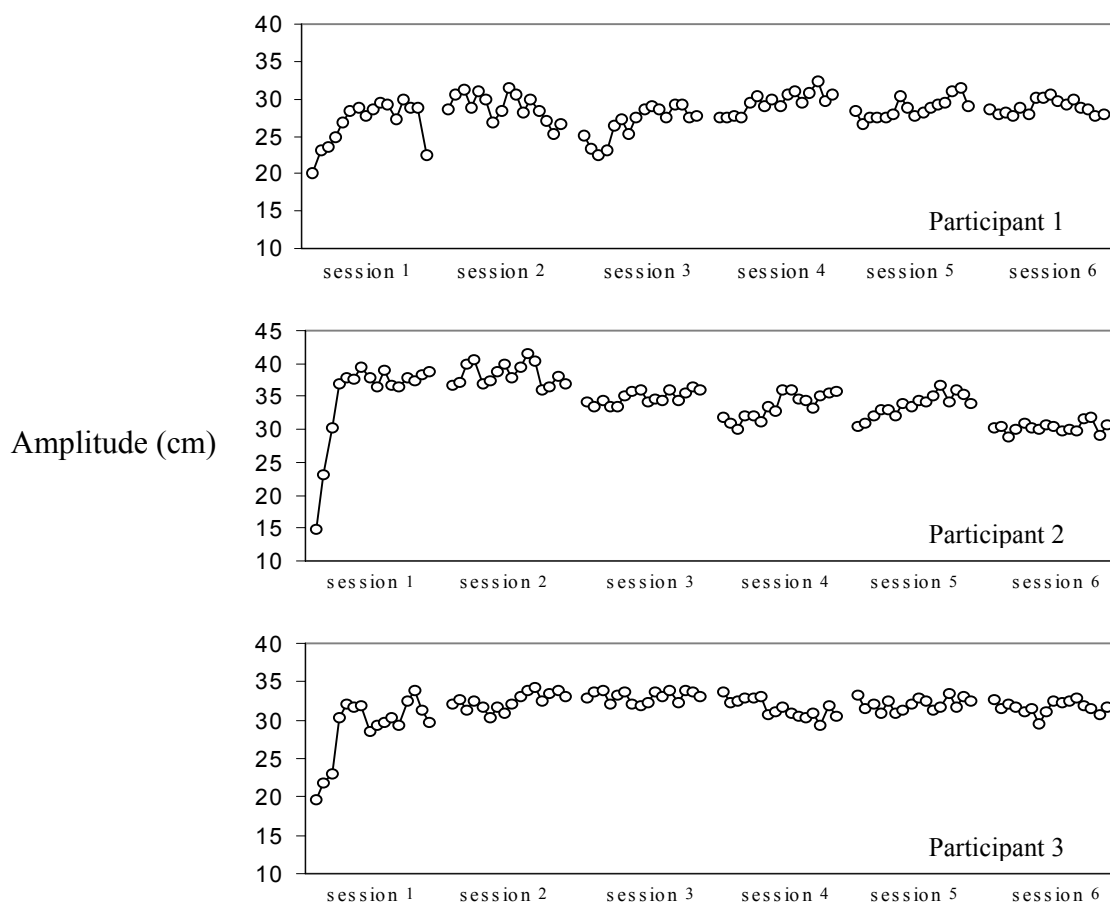
La consommation d'oxygène a été mesurée en continu grâce au Cosmed K2, un système portable télémétrique mesurant le  $\dot{V}E$  (volume d'air expiré en litres par minute) et la  $\dot{V}O_2$  (volume d'oxygène consommé en litre par minute). Les participants étaient équipés d'un masque facial, connecté à une unité d'analyse et de transmission (poids 400 g), fixée devant la ceinture. Les données étaient envoyées par télémétrie à une base réceptrice et stockées pour les analyses ultérieures. Les données ont été moyennées sur chaque intervalle

de 30 secondes. L'efficacité énergétique a été estimée au travers du calcul du coût de mouvement, défini comme le produit amplitude X fréquence X  $\dot{V}O_2$ , exprimé en  $ml.kg.s^{-1}$  (Durand *et al.*, 1994). A cause de la latence des processus aérobie, les données de  $\dot{V}O_2$  n'ont pas été considérées comme valides durant les deux premières minutes de chaque essai. Le coût de mouvement a donc été calculé pour les 30 dernières secondes des deux dernières minutes de chaque essai.

### 3. Résultats

#### 3.1 Amplitude

Une évolution assez similaire de l'amplitude a été observée chez les trois participants (Figure 10).



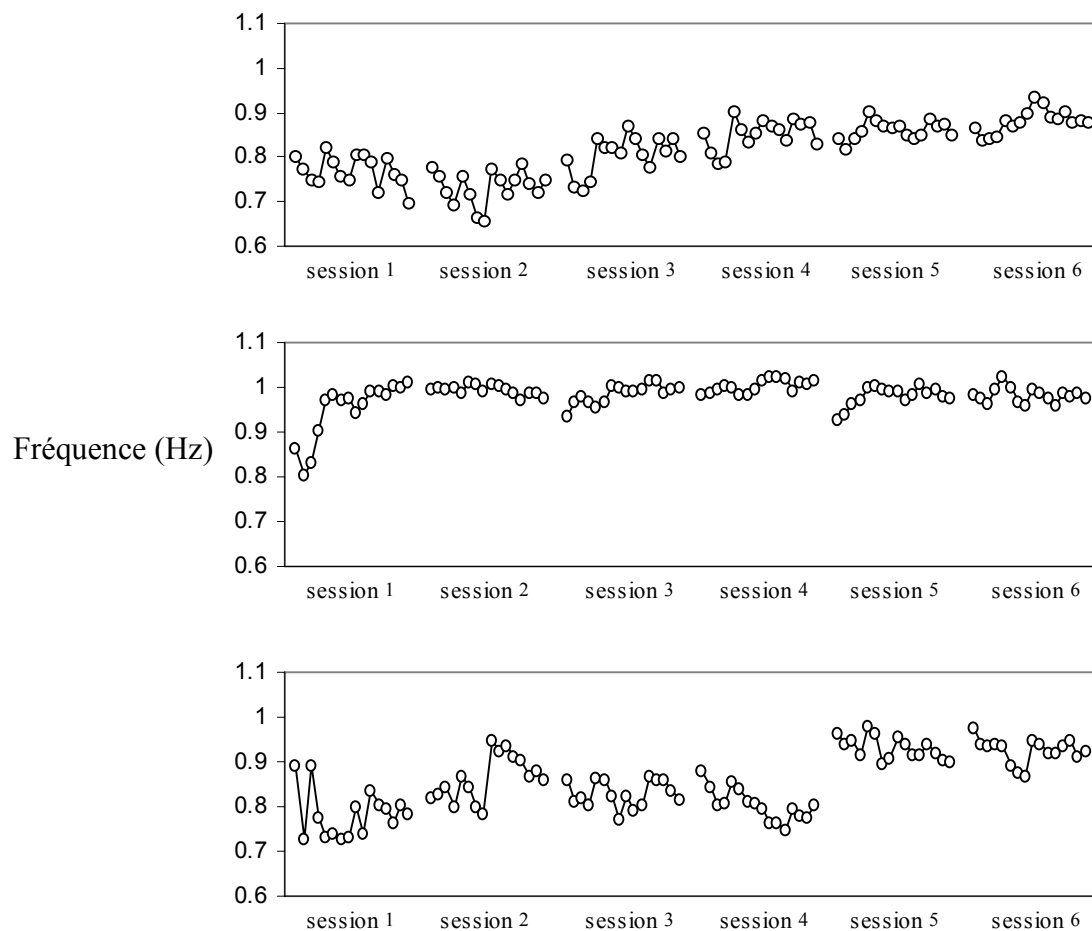
**Figure 10 :** Evolution individuelle de l'amplitude des oscillations (cm) avec la pratique.

L'amplitude maximale a été atteinte durant la première session, à partir du troisième essai pour le participant 1, et à partir du second pour les participants 2 et 3. Dès le tout début de l'expérimentation, les participants semblaient capables de réaliser des amplitudes

comprises entre 15 et 20 cm. Cependant, les amplitudes maximales restent modérées : 30 cm pour le participant 1, juste au-dessus de 40 cm pour le participant 2 durant la seconde session, puis l'amplitude tend à diminuer, 35 cm pour le participant 3.

### 3.2 Fréquence

Les patrons d'évolution de la fréquence ont été assez différents d'un participant à l'autre, malgré une tendance générale à l'accroissement durant l'expérimentation (Figure 11).

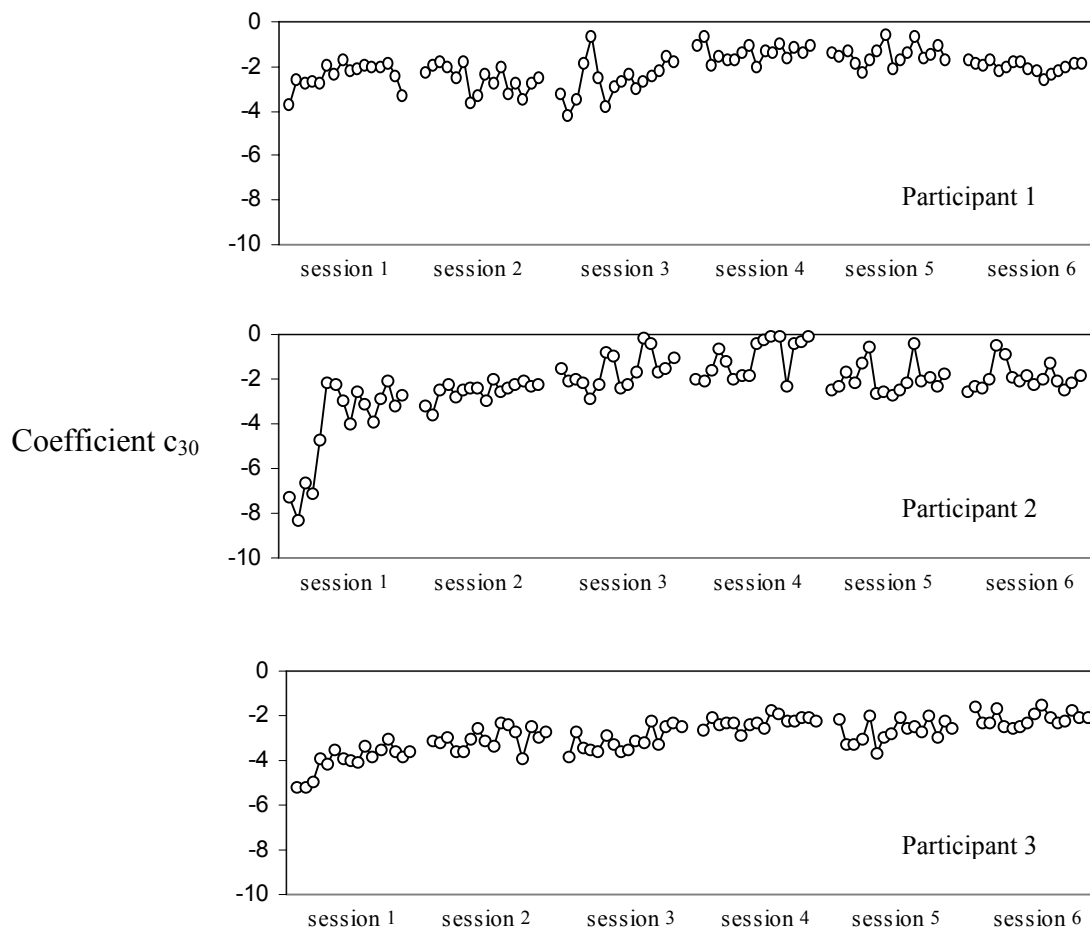


**Figure 11:** Evolution individuelle de la fréquence d'oscillation (en Hz) avec la pratique.

Le participant 1 a présenté un accroissement progressif et modéré de la fréquence. Un accroissement plus abrupt était observé pour le participant 2 juste après le premier essai et avec une stabilisation subséquente autour de 1.0 Hz. Finalement le participant 3 a présenté un accroissement brutal mais assez tardif, au début de la cinquième session.

### 3.3 Coefficients de raideur

Les coefficients de la fonction de raideur ( $c_{10}$ ,  $c_{30}$  et  $c_{50}$ ) présentaient des évolutions parallèles durant l'expérimentation. A titre d'exemple, la Figure 12 sur l'évolution du coefficient  $c_{30}$  est présentée. Dans la mesure où  $c_{10}$  et  $c_{50}$  sont tous les deux de signe opposé, leur évolution était en miroir, par rapport à celle de  $c_{30}$ .



**Figure 12** : Evolution individuelle du coefficient de raideur  $c_{30}$  avec la pratique.

Comme dans l'expérience de Nourrit et collaborateurs, avec la version modifiée du simulateur, les coefficients de raideur présentaient en début de pratique des valeurs absolues élevées ( $c_{10}$  et  $c_{50}$  étant positifs, et  $c_{30}$  négatif). Avec la pratique,  $c_{10}$  s'est stabilisé autour de 1.0, tandis que  $c_{30}$  et  $c_{50}$  rejoignaient des valeurs proches de 0. La pratique a donc semblé induire, comme dans l'expérience précédente, une linéarisation de la fonction de raideur (voir aussi Figure 9). Cette linéarisation est apparue progressive pour les participants 1 et 3, mais plus brutale pour le participant 2, avec une soudaine diminution de la valeur absolue des coefficients durant le second essai de la première session.

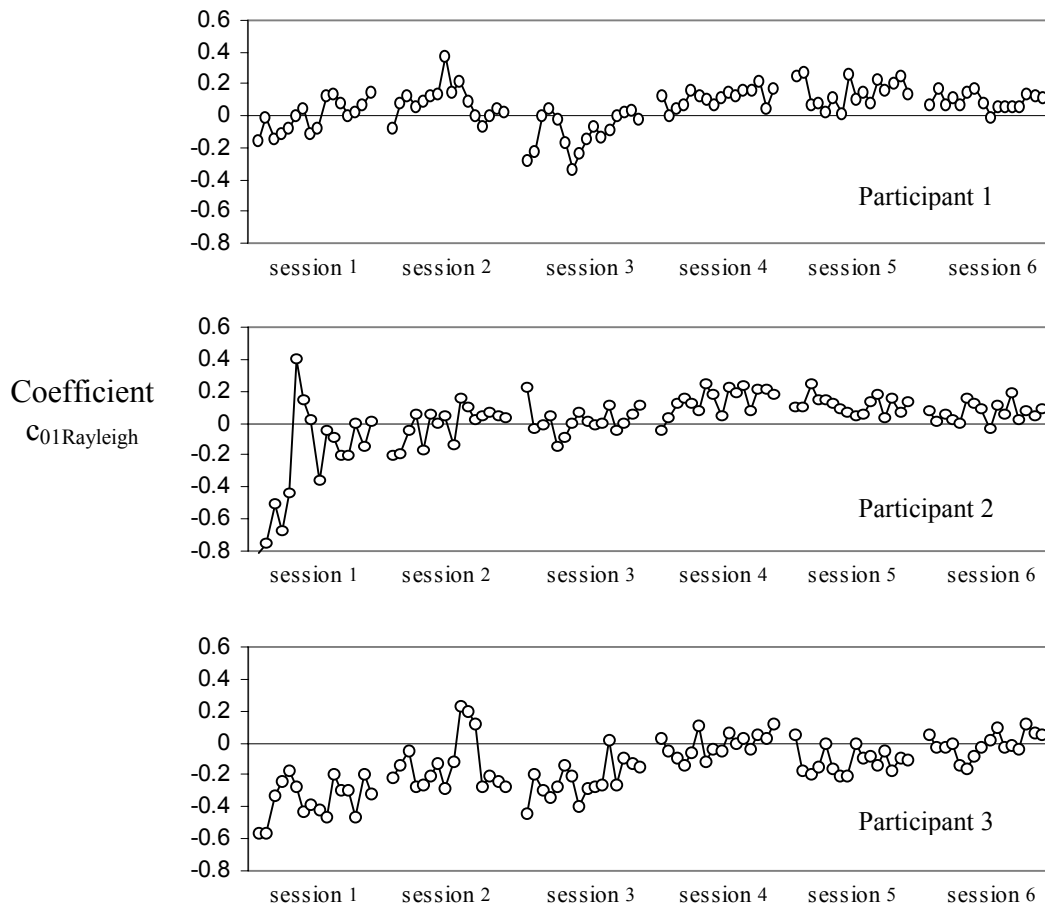
### 3.4 Fonction d'amortissement

L'évolution du modèle a été assez similaire d'un participant à l'autre. Comme dans l'expérience de Nourrit et al. (2003), les premiers essais sont caractérisés par l'exploitation d'une fonction d'amortissement de type Rayleigh, et les participants tendent avec la pratique à transiter vers un comportement de type van der Pol. Afin de visualiser cette transition au travers de l'évolution d'une métrique unique, la méthode proposée par Nourrit et al. (2003) qui consiste à forcer l'estimation d'un modèle Duffing + Rayleigh pour l'ensemble des essais mesurés a été utilisée. Cette méthode donne une valeur négative pour le coefficient d'amortissement linéaire ( $c_{01}$ ) lorsque le modèle sous-jacent est de type Rayleigh, et une valeur positive pour un modèle van der Pol. Nourrit et al. (2003) ont appelé  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  ce coefficient linéaire « forcé ».

Ce coefficient permet une description continue de l'évolution du comportement d'amortissement, malgré l'évolution qualitative des modèles sous-jacents. De plus, la valeur absolue de  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  donne une indication de la stabilité du comportement correspondant, les valeurs proches de zéro (positives ou négatives) suggérant un cycle limite instable. L'évolution individuelle de  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  est présentée en Figure 13.

Le participant 1 présentait durant les deux premières sessions un comportement relativement instable, avec une alternance fréquente entre les amortissements Rayleigh et van der Pol. La troisième session révélait une sorte de régression, en considérant la tendance globale de l'évolution, avec l'adoption nette d'un comportement Rayleigh stable, notamment durant les essais 2 et 3. Les trois dernières sessions semblaient dominées à l'inverse par un comportement d'amortissement de type van der Pol. Néanmoins, le coefficient revenait fréquemment à des valeurs proches de 0, suggérant l'instabilité persistante du système.

Le participant 2 a exploité durant le premier essai un comportement Rayleigh très net. Puis il a semblé initier une phase particulièrement instable, durant laquelle le coefficient  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  oscillait continuellement entre des valeurs positives et négatives, jusqu'à la fin de la troisième session. A partir du début de la quatrième session, ce participant exploitait plus systématiquement un comportement d'amortissement de van der Pol, même si ce comportement apparaissait assez instable durant la dernière session.



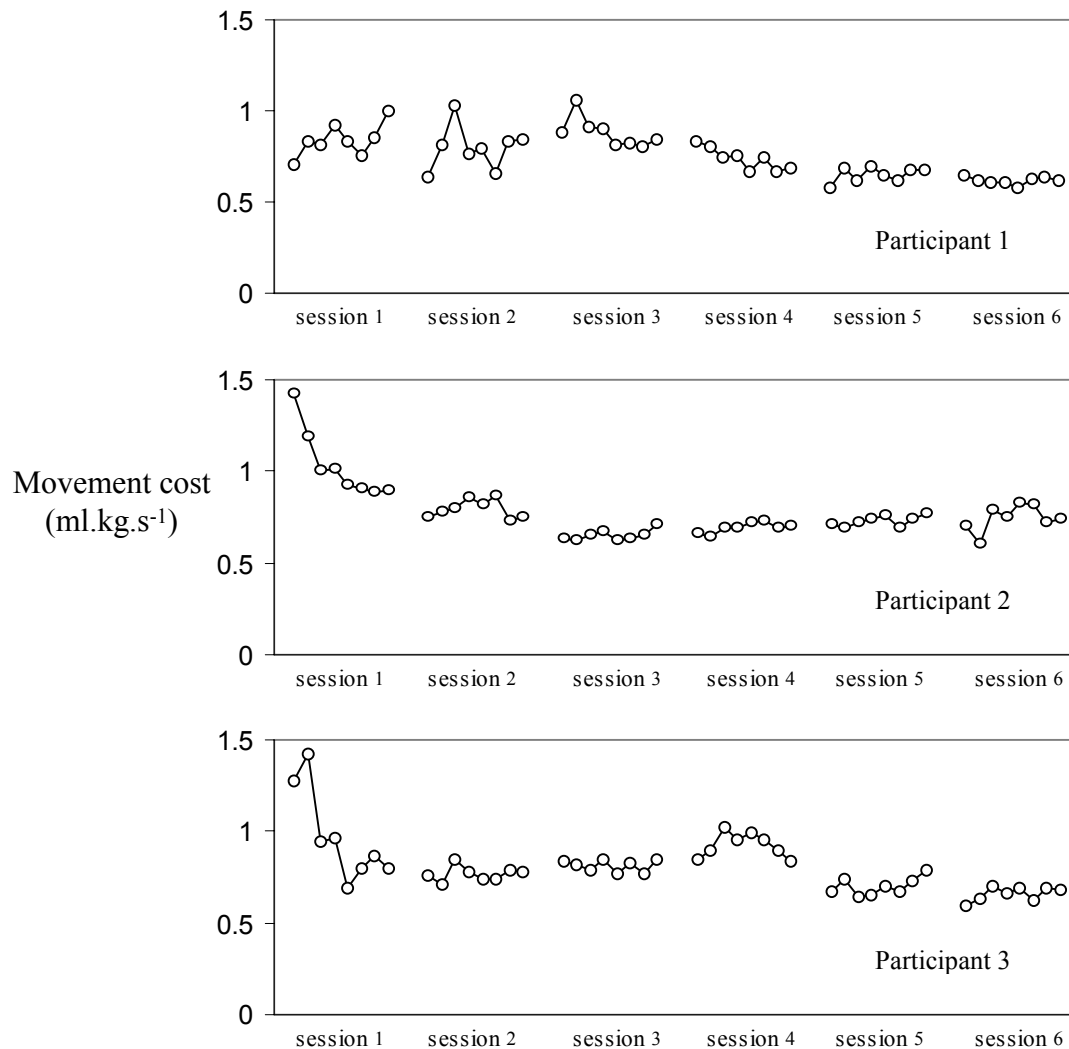
**Figure 13** : Evolution individuelle du coefficient  $c_{01(Rayleigh)}$  avec la pratique.

Enfin, le troisième participant a présenté une évolution assez progressive. Les trois premières sessions étaient caractérisées par un comportement Rayleigh assez consistant, à part le troisième essai de la seconde session, durant laquelle un amortissement de van der Pol fut exploité de manière fugitive. Puis ce participant entra dans une phase d'instabilité, au cours de laquelle l'amortissement alterna entre les deux types de comportement. Cette instabilité perdura jusqu'à la fin de l'expérimentation, et le comportement de van der Pol ne sembla jamais définitivement installé chez ce participant.

### 3.5 Coût du mouvement

D'une manière générale nos résultats décrivent une diminution du coût de mouvement avec la pratique (Figure 14). Ici aussi les évolutions semblent très individualisées. Pour le participant 1e coût est resté stable durant les trois premières

sessions, puis a commencé à décroître à partir de la quatrième. Le participant 2 a présenté une tendance de décroissance exponentielle, avec une diminution particulièrement importante lors de la première session. Le participant 3 présentait une évolution similaire, avec cependant un accroissement transitoire du coût durant la quatrième session.



**Figure 14** : Evolution individuelle du coût du mouvement avec la pratique.

#### 4. Discussion

Les résultats concernant l'amplitude révèlent une adaptation assez rapide des participants aux exigences de la tâche. Tous les participants ont atteint leur performance maximale dès la première session, et plus précisément lors du second essai de la première session. Des résultats similaires ont déjà été observés dans d'autres expériences sur le simulateur de ski (Hong & Newell, 2005; Vereijken, 1991). On peut noter cependant que l'amélioration de la performance ne constitue pas nécessairement un bon indice

d'apprentissage, comme ont pu le montrer de récentes expérimentations sur l'acquisition des habiletés complexes (Delignières et al., 1998; Nourrit et al., 2003). Les novices semblent en effet capables d'exploiter leur comportement initial pour atteindre des niveaux acceptables de performance, avant d'engager une véritable évolution comportementale. Delignières et al. (1998), par exemple, ont montré dans leur expérience sur les barres parallèles que les participants étaient capables d'atteindre des amplitudes d'oscillation similaires à celles des experts, tout en continuant à exploiter un comportement typique de débutant.

De même, Nourrit et al. (2003) rapportent que les évolutions significatives de la coordination apparaissent généralement quelques sessions après l'atteinte de la performance maximale. En d'autres termes, il semble nécessaire de faire une distinction entre adaptation (un processus à court terme permettant de satisfaire grossièrement aux exigences de la tâche et d'atteindre un niveau acceptable de performance), et apprentissage (caractérisé par l'adoption et la stabilisation d'un nouveau pattern de coordination). Cette distinction semble particulièrement importante pour ces tâches complexes, qui demandent une complète réorganisation des modes de coordination, même si le but explicite est « seulement » d'atteindre un niveau donné de performance.

Malgré les différences inter-indivuelles, les autres variables révèlent une communauté de tendances dans l'évolution du comportement. Le résultat le plus important est l'accroissement, avec la pratique, du coefficient  $c_{01(\text{Rayleigh})}$ , révélant la transition d'un amortissement Rayleigh à un amortissement van der Pol. Ce résultat est consistant avec les observations de Nourrit et al. (2003), et confirme que le comportement de Rayleigh représente la solution typiquement adoptée par les débutants sur le simulateur de ski.

Le modèle observé durant les premiers essais, incluant une fonction de raideur fortement non-linéaire et un amortissement Rayleigh, présente l'avantage de donner au sujet du temps disponible durant la seconde partie du demi-cycle, permettant une gestion plus confortable du point de revirement. Ce temps disponible est procuré d'une part par le terme négatif cubique de Duffing ( $c_{30}$ ), qui induit un ralentissement local au-delà d'une amplitude critique, et par la fonction d'amortissement de Rayleigh, qui est caractérisée par un pic de vitesse précoce, dans la première partie du demi-cycle.

De plus, l'adoption du comportement de van der Pol, révélée par les valeurs positives du coefficient, apparaît clairement pour les participants 1 et 2, mais demeure incertaine pour le participant 3, qui montre une longue alternance entre valeurs positives et négatives tout au long de l'expérience. De plus, les valeurs positives observées pour les participants 1 et 2 restent relativement faibles, comparées avec celles obtenues par Nourrit et al. (2003),

suggérant que la durée de pratique n'a pas été suffisante pour permettre l'installation complète du nouveau comportement.

Nourrit et al. (2003) ont montré que le début de la phase de transition du comportement Rayleigh au comportement van der Pol était marquée par un brutal accroissement de la fréquence d'oscillation (dans leur expérience de 1.0 à 1.4 Hz, approximativement). Ce lien entre amortissement et fréquence a été expliqué par les propriétés connues de ces deux fonctions d'amortissement, qui induisent des relations différentes entre amplitude et fréquence. Dans le cas d'un oscillateur de van der Pol, l'amplitude est indépendante de la fréquence. A l'inverse, avec un oscillateur de Rayleigh, un accroissement de la fréquence entraîne une diminution de l'amplitude.

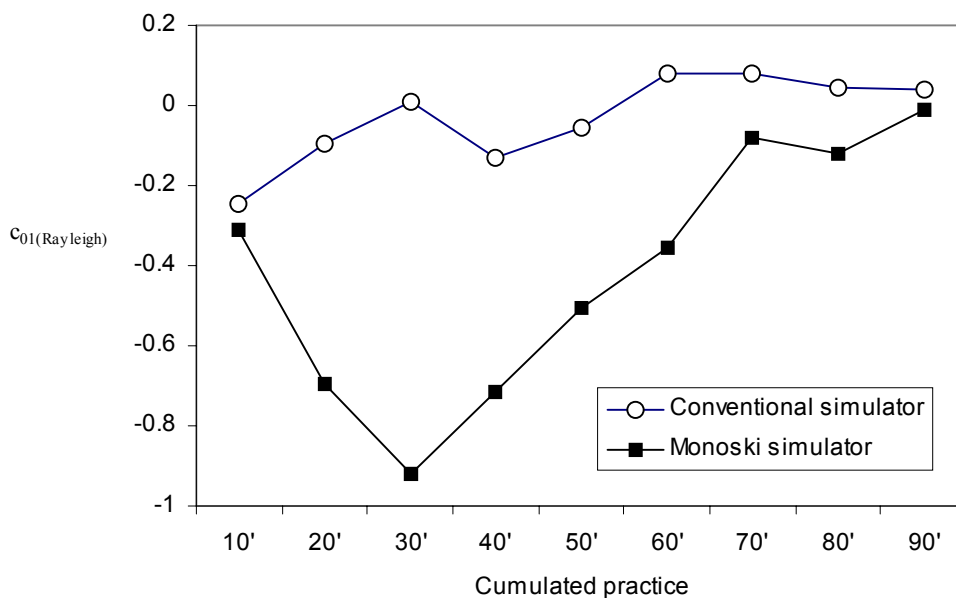
Selon Nourrit et al. (2003), ces propriétés constituent un élément déterminant pour la transition du modèle Rayleigh au modèle van der Pol. Alors que les participants deviennent capables de gérer de manière satisfaisante les points de revirement du mouvement, le ralentissement local (contrôlé par le terme cubique de  $x^3$ ) n'est plus nécessaire. Donc le coefficient  $c_{30}$  coefficient diminue, déterminant un accroissement de la fréquence. Mais à ce moment les participants ont déjà atteint une amplitude importante. La relation amplitude-fréquence de l'oscillateur de Rayleigh ne permet pas le maintien de telles amplitudes avec un accroissement de la fréquence. En conséquence, l'adoption d'un nouveau comportement d'amortissement préservant l'amplitude sous de hautes fréquences apparaît nécessaire.

Ce lien entre fréquence et amortissement apparaît dans nos résultats, au travers des évolutions parallèles de la fréquence et du coefficient  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  (Figures 11 et 12). Une observation plus détaillée, cependant, suggère que ce lien ne soit pas si direct : par exemple, l'accroissement soudain de la fréquence, pour le participant 3, lors des sessions 5 et 6 n'est pas accompagné d'un accroissement notable du coefficient d'amortissement. Comme le suggèrent Nourrit et al. (2003), l'accroissement de la fréquence ouvre la possibilité d'une transition plus aisée vers le comportement van der Pol, mais cette transition peut dans certains cas être retardée. De plus, la fréquence finale, autour de 1.0 Hz, est plus faible que celle observée par Nourrit et al. (2003). Cette divergence dans les résultats pourrait être liée à une différence dans les tensions des bandes élastiques entre les deux expérimentations.

L'évolution du comportement d'amortissement paraît également étroitement liée au coût du mouvement. Le comportement de Rayleigh apparaît particulièrement inefficace (voir, par exemple, participants 2 et 3, session 1, et participant 1 ; session 3), et inversement le comportement van der Pol semble correspondre à un usage optimale des propriétés biomécaniques du système. Le comportement van der Pol est caractérisé par un retardement

du forçage, qui apparaît dans la seconde partie de l'oscillation (Nourrit et al., 2003). Vereijken (1991) a montré que l'apparition progressive de ce retard était l'un des faits les plus marquants de l'apprentissage sur le simulateur de ski, et a suggéré que cette stratégie était la plus efficace : dans un premier temps le sujet exploite la force de retour de l'appareil, puis il force le système en direction du point de revirement suivant. En contraste, le comportement Rayleigh est caractérisé par un forçage précoce, qui semble interférer avec la force de rappel durant la première partie du demi-cycle.

Il est important de garder à l'esprit que ces résultats représentent une fenêtre temporelle plus étroite que ceux de Nourrit et al. (2003). Nos participants ont cumulé 96 minutes de pratique, contre 390 minutes pour les 5 participants de l'expérience précédente. La Figure 15 présente une comparaison entre les évolutions des coefficients  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  dans les deux recherches. Les valeurs du coefficient sont moyennées entre participants sur des quantités similaires de pratique cumulée, dans les deux expérimentations. Il faut noter que les deux premiers points de la courbe monoski sont contaminés par les résultats d'un des participants de Nourrit et al., qui avait étrangement adopté un comportement van der Pol durant les deux premières sessions de pratique.



**Figure 15:** Comparaison de l'évolution du coefficient  $c_{01(\text{Rayleigh})}$ , dans l'expérience présente (simulateur classique) et dans le travail de Nourrit et al. (2003; simulateur de monoski). Dans chaque expérience, les données ont été moyennées entre sujets et pour des quantités similaires de pratique.

Le résultat le plus important est évidemment l'évolution relativement précoce du coefficient  $c_{01(\text{Rayleigh})}$  dans notre expérience, en comparaison avec celle observée dans la précédente. Les six premières sessions de l'expérience de Nourrit et al. (2003) étaient caractérisées par un comportement Rayleigh stable et consistant (à l'exception des deux premières sessions pour l'un des 5 participants). Avec une quantité similaire de pratique, les participants de l'expérience présente ont déjà adopté un comportement van der Pol, ou sont entrés dans la phase de transition menant à son adoption définitive. Ces deux expérimentations décrivent la même évolution, mais le processus apparaît plus lent avec la version monoski du simulateur.

En résumé, ce travail confirme que le comportement spontanément adopté par les débutants lorsqu'ils sont confrontés pour la première fois au simulateur de ski est caractérisé par un amortissement de Rayleigh. Avec la pratique, les participants tendent à adopter un autre comportement d'amortissement, caractérisé par une fonction de type van der Pol, et davantage adapté pour résoudre de manière efficiente le problème posé par la tâche. La transition vers le comportement van der Pol peut apparaître très tôt (voir participant 1), mais Nourrit et al. (2003) ont montré que dans une version plus difficile de la tâche, cette transition pouvait être largement retardée. Un certain nombre d'articles antérieurs ont mis en avant la résistance au changement des modes de coordination spontanés des débutants, lors de l'apprentissage d'une tâche nouvelle (Delignières et al., 1998; Nourrit et al., 2003). Les présents résultats incitent à relativiser cette conclusion, en fonction de la difficulté de la tâche. L'émergence possible, très tôt dans la pratique, du comportement expert pourrait alors expliquer l'observation systématique du comportement van der Pol dans l'expérience de Delignières et al. (1999). Cela montre la nécessité de contrôler strictement le niveau initial des participants dans de telles expériences.

Certaines réserves pourraient être émises sur la possibilité de généraliser des résultats obtenus avec uniquement trois participants, et surtout face aux importantes différences inter-individuelles qui ont été mises en évidence sur plusieurs variables. Cependant, concernant l'hypothèse principale ayant motivé ce travail, les résultats sont remarquablement consistants entre participants: tous adoptent le même comportement Rayleigh en début de pratique, puis présentent une évolution précoce (comparée avec celle observée par Nourrit et al.) vers le comportement van der Pol.

D'un autre côté, il semble difficile d'espérer dans une tâche si complexe une grande consistance inter-individuelle du comportement. Comme le pointe Bernstein (1967), l'apprentissage demande la coordination de nombreux et redondants degrés de liberté. Cette

redondance suggère que la même dynamique, au niveau macroscopique, puisse être réalisée en utilisant différentes dynamiques de coordination au niveau local. Hong et Newell (2005) ont récemment proposé un intéressant exemple de ce principe de redondance sur le simulateur de ski, dans lequel des sujets produisent soit des relations de phase, soit d'anti-phase entre les mouvements des deux genoux, tout en préservant l'invariance du couplage global entre le centre de gravité et les mouvements du simulateur. De même, la transition du comportement Rayleigh au comportement van der Pol peut être réalisée selon des chemins différents, révélés par les différences inter-individuelles dans l'évolution de la fréquence et des coefficients de raideur.

Plus généralement, cette expérience confirme quelques hypothèses importantes concernant l'évolution du comportement durant l'apprentissage de tâches complexes. Le premier est l'existence de tendances spontanées de coordination qui mènent les novices à adopter des comportements similaires, lorsqu'ils sont confrontés à une tâche nouvelle. Ces modes de coordination spontanés sont généralement caractérisés par une synchronisation absolue des phases et des fréquences, permettant un contrôle relativement simple de la dynamique globale (Delignières et al., 1998; Nourrit et al., 2003). Ce premier mode de coordination permet le plus souvent d'atteindre un niveau acceptable de performance.

Deuxièmement, la pratique induit généralement l'adoption d'un nouveau mode de coordination, souvent plus complexe en termes de relations de phases et ou de fréquences (Delignières et al., 1998), mais permettant une meilleure adaptation aux contraintes mécaniques de la tâche. L'adoption de ce comportement expert est révélée par une amélioration de la stabilité de la coordination et de l'efficacité énergétique.

Troisièmement, la transition du comportement débutant au comportement expert apparaît comme un processus progressif réalisé au cours d'une phase de transition au cours de laquelle les deux comportements sont exploités en alternance.

L'expérience présente conforte ces trois hypothèses, et montre que dans certains cas les sujets peuvent abandonner rapidement leur comportement initial et entrer de manière précoce dans la phase de transition menant à l'adoption du comportement expert.

---

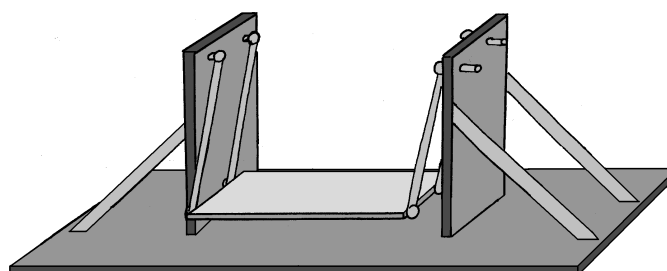
*Chapitre III : Nature de la transition au niveau des coordinations**Expérience 2***1. Introduction**

L'expérience précédente, complétant le travail de Nourrit et al. (2003) a permis de confirmer que la transition qui s'opérait entre le comportement débutant et le comportement expert s'opérait par une phase d'alternance, et de montrer que cette transition apparaissait plus ou moins rapidement, en fonction de la difficulté de la tâche et du niveau initial des participants. De plus, nous avons bien observé que ce changement permettait d'obtenir un mouvement plus efficace. Ceci corrobore les travaux de Vereijken (1991) qui suggéraient que le retardement du forçage après le passage en verticale basse était la stratégie la plus efficace, et donc que la phase relative entre les mouvements du centre de gravité et de la plateforme constituait la variable essentielle dans ce type d'apprentissage.

Cependant, dans ces expériences sur simulateur de ski, il est difficile de savoir si l'évolution de cette variable reflète une évolution paramétrique ou un saut qualitatif. Comme l'évoquent Nourrit et al. (2003), les deux modèles identifiés pourraient aussi constituer deux expressions du même modèle hybride, contenant simultanément des termes de Rayleigh et de van der Pol. Ces travaux ne permettent donc pas de conclure de manière définitive sur la nature de la transition observée. En ce sens il semble essentiel de pouvoir observer une transition d'apprentissage, dans une tâche amenant à une discontinuité nécessaire entre comportements débutant et expert, telle que, par exemple, la tâche proposée par Delignières et al. (1998) sur les barres parallèles. En effet, les résultats de cette expérience indiquent en effet que la coordination présente un rapport de fréquence de 1 :1 entre les mouvements de forçage et les oscillations pendulaires chez les débutants, et un rapport de fréquence de 2 :1 chez les experts. Cette tâche, cependant, se révèle peu favorable pour tester notre hypothèse, puisque dans le travail original les sujets débutants n'avaient pu, malgré 80 essais sur la tâche, dépasser leur coordinations initiales (Delignières et al., 1998).

La situation d'apprentissage à construire devrait créer une discontinuité nette entre les coordinations spontanées et les coordinations expertes, et être d'une difficulté moindre permettant un dépassement plus rapide du premier mode de coordination, comme sur le simulateur de ski. Ceci a amené à créer une balançoire expérimentale, constituée d'une

planche de bois oscillant par rapport à un support fixé au sol. Cette planche était reliée au support par quatre tubes métalliques d'une longueur de 50cm, ce qui lui permettait de demeurer à l'horizontale tout au long des oscillations. Les participants se tenaient debout sur cette planche, et avaient pour consigne de créer et entretenir des oscillations latérales fluides et régulières (Figure 16).

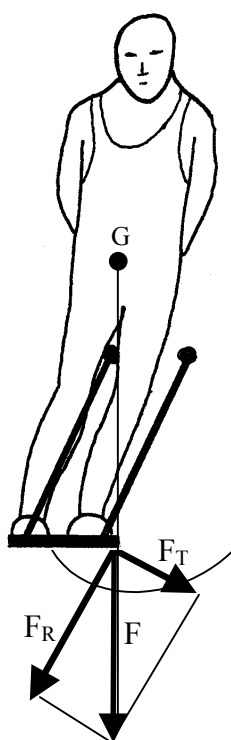


**Figure.16:** Dispositif expérimental

Il faut noter que cette balançoire expérimentale se distingue de la balançoire suspendue traditionnelle. Case (1996) identifie sur cette dernière deux méthodes pour injecter de l'énergie et entretenir les oscillations, nommées *driven oscillation* et *parametric pumping*. La première méthode consiste à injecter de l'énergie en faisant tourner le centre de masse autour de l'extrémité de la corde de la balançoire, tandis que le *parametric pumping* consiste à abaisser et élever le centre de masse le long de la corde pour injecter l'énergie nécessaire (voir également (Kulkarni, 2003; Post, Peper, & Beek, 2003)). Or ces deux méthodes ne peuvent être utilisées dans notre étude. En effet, sur notre balançoire, les participants sont en équilibre instable sur la planche. Ainsi la rotation active du centre de gravité autour des appuis est clairement irréalisable, ce qui empêche l'utilisation de la méthode de *driven oscillation*. De plus, comme le centre de masse est dans notre cas situé au-dessus de l'axe de rotation de la balançoire, la méthode de *parametric pumping* ne peut non plus être utilisée.

La seule solution pour entretenir et amplifier les oscillations consiste alors à exercer une force sur la planche par une extension du corps durant la partie descendante de l'oscillation de la balançoire (Figure 17). Bergé, Pomeau et Dubois-Gange (1997) définissent la notion de forçage en précisant que les frottements d'un système en mouvement permanent rendent inévitable l'entretien du mouvement. Il est donc nécessaire d'apporter de l'énergie afin de maintenir les oscillations. Lorsque la stimulation est périodique, avec une fréquence qui lui est propre, on parle de forçage. Ce terme est

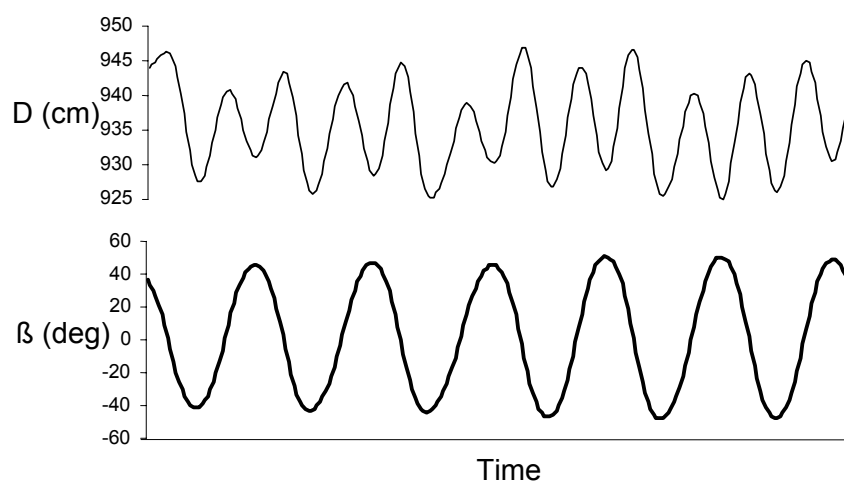
employé pour rendre compte du caractère imposé à la dynamique de l'oscillateur stimulé. De plus, ils précisent que beaucoup de comportements qui résultent de ce forçage sont d'une grande richesse. Sur cette tâche, cette force peut être décomposée en une composante radiale ( $\vec{F}_R$ ) et en une composante tangentielle ( $\vec{F}_T$ ). La composante tangentielle représente le forçage effectif appliqué sur la planche pour amplifier les oscillations. Pour une utilisation optimale des propriétés mécaniques de la balançoire, ce forçage devrait être initié au début du balancer, juste après le point de revirement, et éventuellement poursuivi après le passage de la balançoire en verticale basse.



**Figure 17 :** Représentation schématique du forçage pendant la partie descendante du balancer vers la gauche

L'application de cette force peut être révélée par l'évolution de la distance entre le centre de masse et la planche ( $D$ ). Ainsi, pour une utilisation optimale de la balançoire, il devrait être possible d'observer durant la partie descendante du balancer, une progressive élévation du centre de masse par rapport à la planche. Comme ce forçage peut être répété lors du balancer vers la gauche et lors du balancer vers la droite, la coordination résultante entre l'évolution de  $D$  et des oscillations de la balançoire devrait présenter un rapport de fréquence de 2 :1, avec une synchronisation des minima de  $D$  et des points de revirements de la balançoire. Les résultats obtenus lors d'une pré expérimentation menée sur plusieurs

sessions de pratique confirment ces prédictions (Figure 18). Par convention, un balancer entier (ou cycle), comprend par rapport à la position de repos (verticale basse) un déplacement vers la droite (ou demi-cycle), et un déplacement vers la gauche. Le balancer gauche correspond à la phase ascendante pour atteindre le point de revirement gauche (PR de  $0^\circ$ ) et à la phase descendante pour revenir à la position de repos en verticale basse. De même, le balancer vers la droite correspondra à l'atteinte du point de revirement droit (PR de  $180^\circ$ ).



**Figure 18:** Exemple de séries temporelles de la position angulaire de la plateforme (graphique du bas) et de la distance entre le centre de gravité et la plateforme (graphique du haut), obtenus après une période de pratique. La coordination en 2 :1 entre les deux oscillateurs apparaît clairement, avec une stricte synchronisation des points de revirements.

Les participants après pratique devraient donc adopter ce comportement optimal consistant en un double forçage, chacun situé aux points de revirement, correspondant à un rapport de fréquence de 2/1 et à des PR de  $0^\circ$  et  $180^\circ$ , entre  $D$  et les oscillations de la plateforme. Par contre, selon les principes de verrouillage des fréquences énoncés dans la première partie de cette thèse, les débutants devraient produire un simple forçage, situé aux alentours d'un des points de revirement. Cette tâche devrait donc permettre d'observer un réel changement qualitatif dans le comportement des participants, d'où l'intérêt de se focaliser sur la coordination produite et non sur les mouvements résultants de la plateforme.

Cette différence qualitative devrait permettre de tester l'hypothèse émise par Nourrit *et al.* (2003) sur la nature de la transition. En effet, la tâche créée nécessitant une discontinuité obligatoire, l'hypothèse d'un modèle hybride n'a plus de sens. Et pour

observer toutes les modifications, il est nécessaire de regarder l'évolution cycle-à-cycle de ces coordinations, essais après essais.

Nous faisons donc l'hypothèse que nos débutants vont tous adopter un rapport de fréquence de 1:1, avec une phase relative soit de  $0^\circ$  soit de  $180^\circ$ , entre  $D$  et les mouvements de la plateforme, pour évoluer ensuite vers un rapport de fréquence de 2:1, caractérisé par des phases relatives de  $0^\circ$  et de  $180^\circ$  à l'initiation du forçage.

De plus la transition caractérisée par une phase d'alternance entre le comportement expert et débutant, mis en avant dans l'expérience précédente et dans l'étude de Nourrit *et al.* (2003) au niveau du mouvement de la plateforme, devrait être retrouvée au niveau des coordinations, puisque les participants sont placés dans une situation de compétition.

Si tel était le cas, l'hypothèse peut être émise que cette transition s'apparentera à une bifurcation de type *saddle-node*, où la création d'un nouvel attracteur non présent au départ passera par une phase d'alternance plus ou moins prolongée en fonction de la plus ou moins grande non linéarité du paramètre de contrôle.

## 2. Méthode

### 2.1 Participants

Huit participants (2 femmes et 6 hommes, âge moyen =22.4 ans, ET=1.06) ont participé volontairement à cette étude. Aucun n'avait d'expérience antérieure sur la tâche proposée, ni d'expertise particulière dans des activités similaires, comme le skate-board, la gymnastique ou le ski. Les participants ont signé un formulaire de consentement et n'ont reçu aucune rémunération pour cette expérimentation.

### 2.2 Protocole Expérimental

La tâche a été réalisée au cours de 10 sessions sur 5 jours consécutifs. Chaque session comprenait 10 essais de 20 secondes chacun, entrecoupés d'une minute de repos. Les participants devaient se positionner debout sur la plateforme avec les bras derrière le dos.

Il leur était demandé de se balancer latéralement, en essayant « d'être le plus fluide possible ». Cette instruction était répétée au début de chaque session, sans aucune autre

indication verbale supplémentaire. Deux semaines plus tard, un post-test d'une session a été réalisé.

### 2.3 Recueil des données

Les participants étaient équipés de dix marqueurs réfléchissants, 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. Deux autres marqueurs étaient situés aux extrémités d'une des barres métalliques (11 et 12) afin de mesurer le déplacement angulaire de la plateforme par rapport à l'axe vertical. Enfin, deux marqueurs (13 et 14) étaient fixés au sommet des portants droit et gauche, afin de définir l'axe transversal de l'appareil.

Les mouvements des marqueurs étaient enregistrés en trois dimensions au moyen d'un analyseur de mouvement, le VICON 370 (BIOMETRICS) à quatre caméras, à une fréquence d'acquisition de 50Hz. L'enregistrement était initié, lors de chaque essai, à la fin du premier balancer produit par le participant.

### 2.4 Analyse des données

Les données se présentaient sous forme de séries temporelles tridimensionnelles ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pour chaque marqueur. Dans un premier temps, une rotation du repère a été effectuée, 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 frontal, les coordonnées des marqueurs ont été par la suite traitées en deux dimensions ( $x$  et  $z$ ). Toutes ces données ont été lissées à l'aide d'un filtre Butterworth à une fréquence de coupure de 10Hz.

#### 2.4.1 Variables de performance

Premièrement, la série temporelle de l'angle  $\beta$  a été calculée, définie par l'axe marqueur 11/marqueur 12 et l'axe vertical. Cet angle représente l'amplitude instantanée de

déviations de la plateforme par rapport à sa position de repos. Cette série temporelle a été utilisée pour obtenir les valeurs moyennes d'amplitude, de fréquence et de fluidité de l'angle  $\beta$ . L'amplitude était définie comme la déviation maximale absolue de  $\beta$  par rapport à la position verticale, et était moyennée pour chaque essai. La fréquence a été calculée comme l'inverse de la période du cycle, et moyennée pour chaque essai. La fluidité a été calculée sur la base de la corrélation ( $r$ ) entre  $\beta$  et sa dérivée seconde. L'indice d'harmonie proposé par Mottet et Bootsma (1999) exprimant le pourcentage représenté par les non-linéarités dans la variance totale ( $1-r^2$ ) (ou la déviation moyenne par rapport à l'oscillation harmonique) a été utilisé.

#### 2.4.2 Phase Relative

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.

Ensuite la distance instantanée ( $D$ ) entre le barycentre des marqueurs 9 et 10 (pieds droit et gauche) et le centre de gravité a été calculée. La phase relative entre  $\beta$  et  $D$  a alors été calculée par la méthode de l'estimation ponctuelle, selon la formule suivante :

$$PR = \frac{TD - T\beta_n}{T\beta_{(n+1)} - T\beta_n} \times 360^\circ$$

Cette phase relative discrète correspond à la valeur de la phase de l'angle  $\beta$  lorsque le forçage est initié au cours de chaque cycle.

#### 2.5 Représentation graphique

Pour chaque cycle, une mesure de phase relative est obtenue, voire deux en cas de double forçage. Comme vu précédemment, le cycle a été divisé en deux parties : (i) le balancer gauche, représentant la trajectoire de la plateforme sur le côté gauche, démarrant et finissant dans la position de base de la plateforme et (ii) le balancer droit, représentant la trajectoire sur le côté droit.

Le forçage se produisant pendant le balancer gauche peut alors se traduire par une phase relative comprise entre  $270^\circ$  et  $90^\circ$  via le  $0^\circ$  (point de revirement gauche). Le forçage survenant dans le balancer droit sera compris entre  $90^\circ$  et  $270^\circ$  via le  $180^\circ$  (point de revirement droit).

Trois modes de coordination peuvent donc apparaître théoriquement dans cette tâche :

- le premier peut être constitué d'un forçage unique durant le balancer gauche
- le second d'un forçage unique pendant le balancer droit
- le troisième sera caractérisé par un double forçage, le premier arrivant pendant le balancer gauche et le second pendant le balancer droit.

Pour obtenir une lisibilité graphique des résultats pour des séries où les trois patrons pourraient être potentiellement identifiés, une représentation graphique en trois dimensions a été créée, en projetant les balancers gauches et droits sur deux plans orthogonaux, représentant deux demi-cercles trigonométriques (Figure 19).

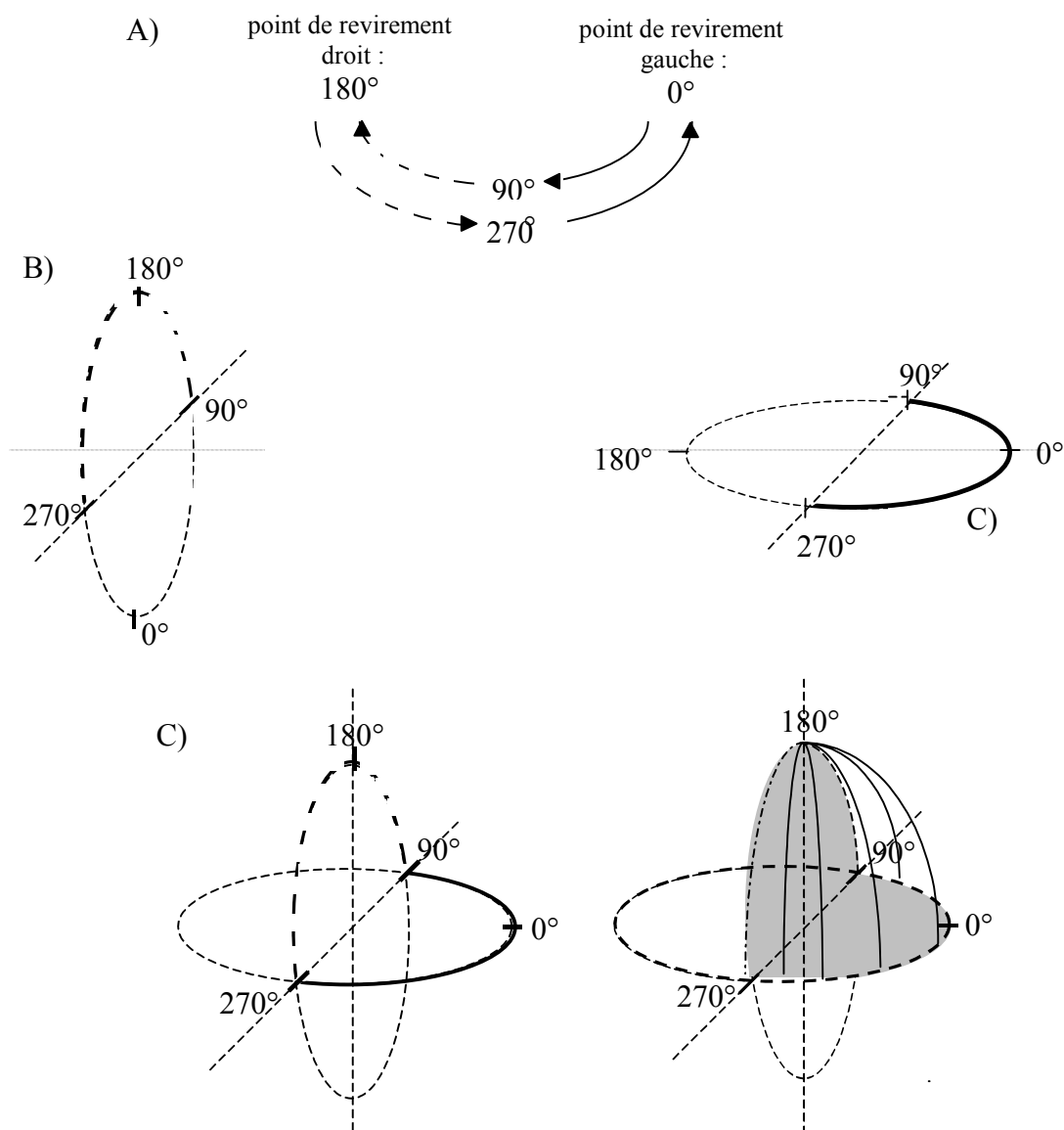
Chaque forçage est représenté par un vecteur phase ayant comme norme le rayon de la sphère, et comme origine le centre de la sphère. Ainsi en fonction du forçage, c'est la direction du vecteur dans cet espace tridimensionnel qui va varier (Figure 20):

- le forçage initié lors du balancer gauche est représenté par le vecteur phase correspondant, dans le plan horizontal, sur le demi-cercle comprenant les phases de  $270^\circ$  à  $90^\circ$ .

- le forçage initié lors du balancer droit est représenté par un vecteur phase dans le plan vertical, sur le demi-cercle comprenant les phases de  $90^\circ$  à  $270^\circ$ .

- le double forçage est représenté par le vecteur résultant de l'addition des deux vecteurs phases, divisé par sa norme dans le but d'obtenir la même taille unitaire pour tous les vecteurs.

Ces deux demi-cercles définissent ainsi un quart de sphère (Figure 20, panel A), sur lequel l'ensemble des modes de coordination possibles peuvent être représentés par le point final du vecteur correspondant sur la surface de la sphère. En regardant cette sphère de face (Figure 20, panel B), il apparaît que tous les forçages initiés lors du balancer à gauche sont représentés par des points situés sur la ligne de l'équateur, tandis que les forçages à droites sont représentés par des points situés sur le méridien. Les doubles forçages sont représentés par des points situés autour de la zone centrale du quart de sphère.

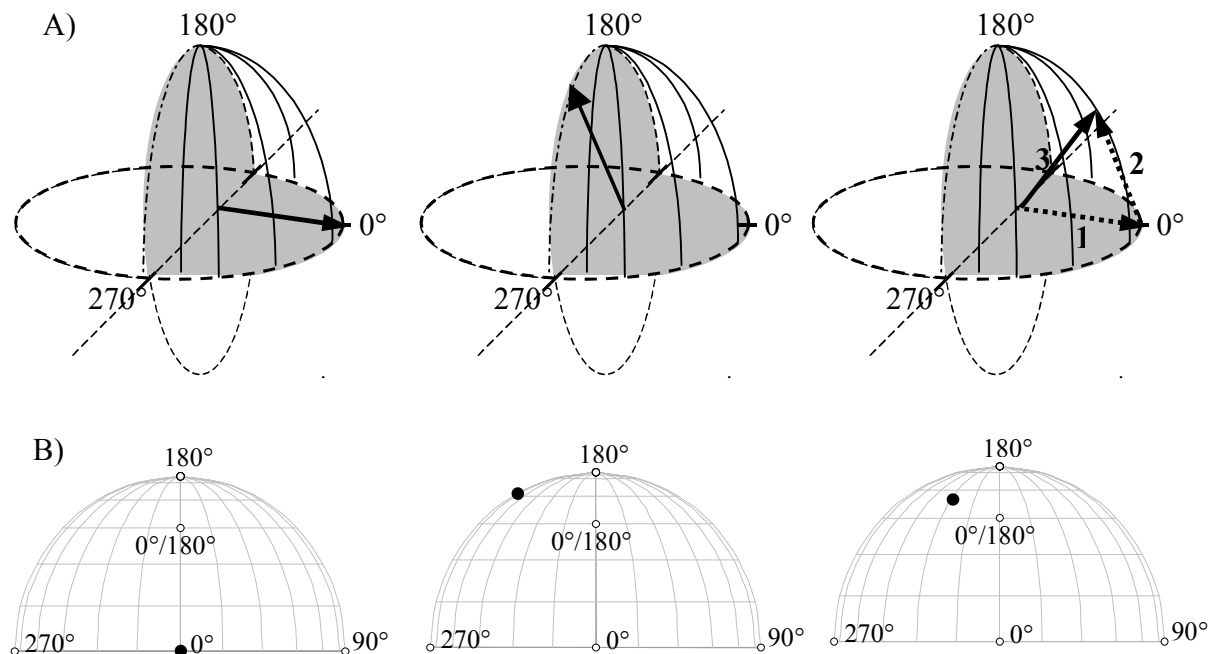


**Figure 19** : panel A)----- balancer droit, — balancer gauche lors d'un cycle complet; panel B) projection orthogonale du balancer droit sur un disque ( à gauche), et projection horizontale du balancer gauche sur un disque (à droite) ; C) emboîtement des deux disques pour créer une sphère. La zone grisée correspond aux phases relatives adoptables.

### 2.5.1.1 Consistance

Cette représentation vectorielle permet d'obtenir une mesure de la consistance du forçage, à l'intérieur de chaque essai. A partir des vecteurs obtenus pour chaque cycle, l'angle défini entre deux vecteurs successifs est calculé. L'angle moyen obtenu par essai donne ainsi une indication sur la consistance globale du forçage : un angle moyen proche

de  $0^\circ$  exprime une très forte consistance entre les cycles, tandis qu'une valeur angulaire élevée correspond à une haute indépendance entre les forçages successifs.



**Figure 20** : panel A) représentation vectorielle pour un forçage à  $0^\circ$  (à droite), à  $200^\circ$  (au milieu), et pour un double forçage à  $0^\circ$  et  $200^\circ$  (à gauche). Ici, l'étape 1 correspond au vecteur  $0^\circ$ , auquel on ajoute le second vecteur  $200^\circ$  (étape 2) pour obtenir le vecteur résultant (étape 3). Panel B) représentation des forçages sur la même sphère vue de face.

## 2.6 Analyses Statistiques

Les variables de performance (amplitude de  $\beta$ , fréquence et fluidité) et la consistance ont été analysées par des ANOVA à un facteur (Session), avec 11 niveaux de mesures répétées. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été auparavant testées, et un seuil de significativité 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. Un test post-hoc de Tuckey a été réalisé sur les effets significatifs afin de localiser les différences.

### 3. Résultats

#### 3.1 Variables de performances

##### 3.1.1 Evolution de l'amplitude

Un effet session significatif a été obtenu ( $F_{10,70} = 35.1$ ;  $p < .05$ ). L'amplitude augmente de  $69.1^\circ (\pm 17.5^\circ)$  lors de la première session à  $117.7^\circ (\pm 17.8^\circ)$  pour la dernière session. Le test de Tuckey indique une différence significative de l'amplitude entre la session 1 et toutes les autres, entre la session 2 et les sessions 4 à 11, et entre la session 3 et les sessions 5 à 11, et entre la session 4 et les sessions 10 et 11. Il n'y a pas de différence significative entre la dernière session et le post-test (Figure 21).

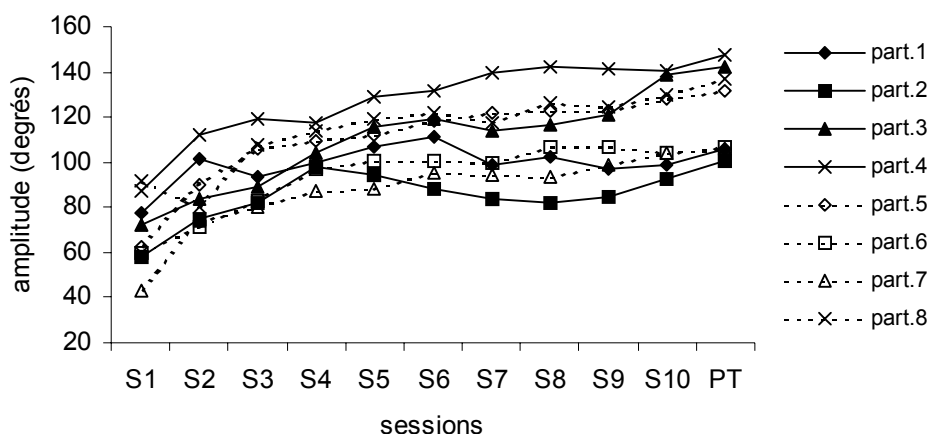


Figure 21 : Evolution de l'amplitude des oscillations au cours des sessions

##### 3.1.2 Evolution de la fréquence

Il n'y a pas d'effet significatif pour la fréquence au cours des sessions ( $F_{10,70} = 1.38$ ;  $p > .05$ ). Cependant tous les participants convergent vers une fréquence de 1.2Hz au cours des sessions. Il faut noter le comportement hors norme du participant 7, qui ne s'aligne sur cette fréquence que lors du post-test, après avoir oscillé à des fréquences élevées tout au long des sessions de pratique (Figure 22).

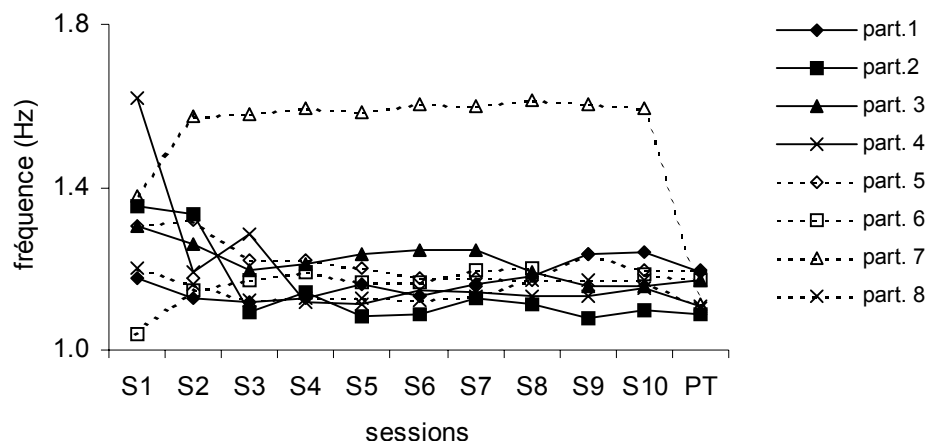


Figure 22 : Evolution de la fréquence des oscillations au cours des sessions

### 3.1.3 Evolution de la fluidité

Un effet significatif a été obtenu ( $F_{10,70} = 14.2$ ;  $p < .05$ ) pour le facteur session. Pour tous les participants, la fluidité tend à diminuer avec la pratique, avec un index qui passe de 0.16 ( $\pm 0.08$ ) lors de la première session à 0.27 ( $\pm 0.1$ ) lors de la dernière session.

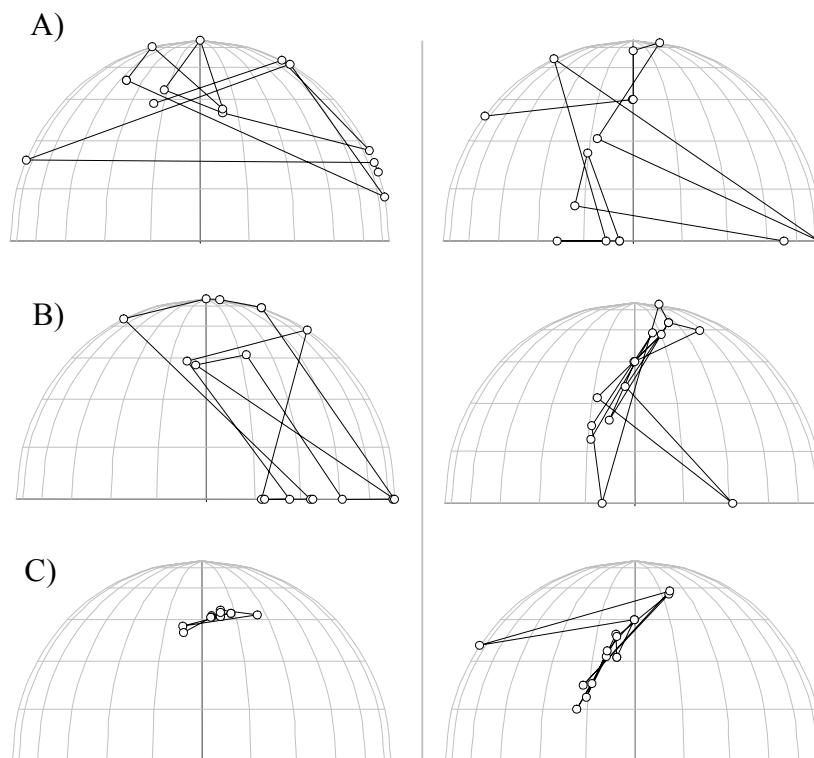
Le test post-hoc de Tuckey indique une différence significative entre les sessions 1 et 2 et les sessions 10 et 11, ainsi qu'entre la session 11 et toutes les autres sessions.

## 3.2 Evolution des modes de coordination

### 3.2.1 Evolution des forçages

La représentation sphérique permet d'obtenir une évaluation qualitative de l'évolution des stratégies de forçage au cours de l'apprentissage. La figure 23 présente les sphères de deux participants, lors d'un essai de la session 1, 5, et 10. Les premiers essais sur la balançoire sont caractérisés par une coordination très instable, dominée par une stratégie en simple forçage, assimilable à une période d'exploration des modes de coordination possibles (Figure 23, panel A). Au milieu de l'apprentissage, la stratégie en simple forçage est plus consistante, centrée autour des points de revirement (i.e., autour du pôle et au centre de l'équateur dans la représentation graphique). A ce moment, le simple forçage est exploité en alternance avec le double forçage, avec de fréquents changements, d'un cycle à l'autre, d'un mode de coordination à l'autre (Figure 23, panel B). Finalement, les derniers essais sont dominés par des stratégies de double forçage. Ces modes de

coordination sont exploités d'une manière plus consistante, avec de rares excursions vers un mode de coordination en simple forçage lors de cycles isolés (Figure 23, panel C).

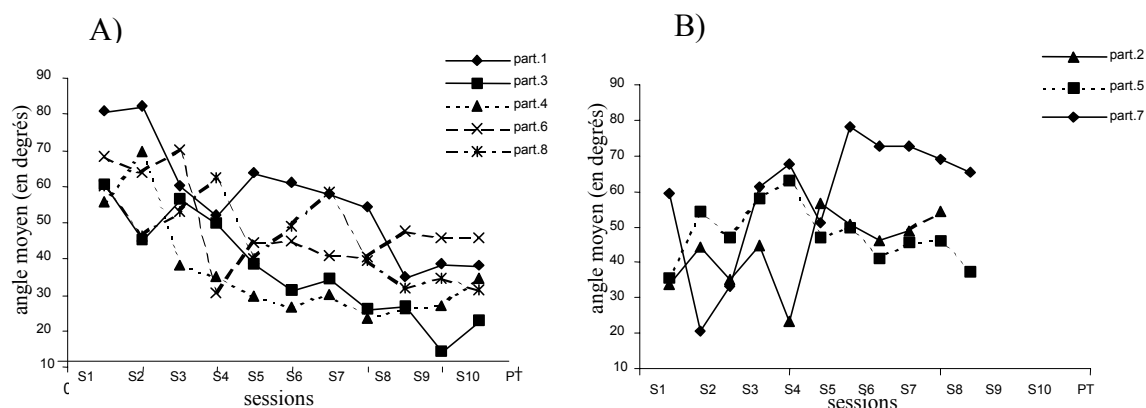


**Figure 23:** Représentation sphérique des modes de coordinations pour les participants 4 (à gauche) et 6 (à droite), lors du 5<sup>ème</sup> essai des sessions 1 (en haut), 5 (au milieu) et 10 (en bas).

### 3.2.2 Evolution de la consistance

Aucun effet significatif n'a été obtenu ( $F_{10,70} = 1.27$ ) pour le facteur session. L'évolution individuelle des participants révèle que l'angle moyen exprimant la consistance du mouvement décroît pour 5 participants (Figure 24, panel A), alors qu'elle a tendance à croître ou à se stabiliser pour d'autres (Figure 24, panel B).

La Figure 25 présente l'évolution des participants 1 et 5, au niveau des coordinations adoptées et de leur consistance. Le participant 5 (panel A) adopte lors de la première session un forçage situé autour du passage en verticale basse (autour de  $270^\circ$ ), de manière assez stable, puisque l'angle moyen est de  $38^\circ$ . On note deux excursions vers un double forçage lors de cet essai. Les sessions suivantes vont être marquées par une diminution de la consistance du comportement. L'essai 5 de la session 5 illustre ce phénomène, avec un rapprochement du simple forçage vers le point de revirement gauche ( $0^\circ$ ), qui se fait en alternance avec l'exploitation d'un double forçage. Par la suite, l'angle moyen décroît lentement, au fur et à mesure que le participant se fixe sur un double forçage, prédominant lors de la session 10.

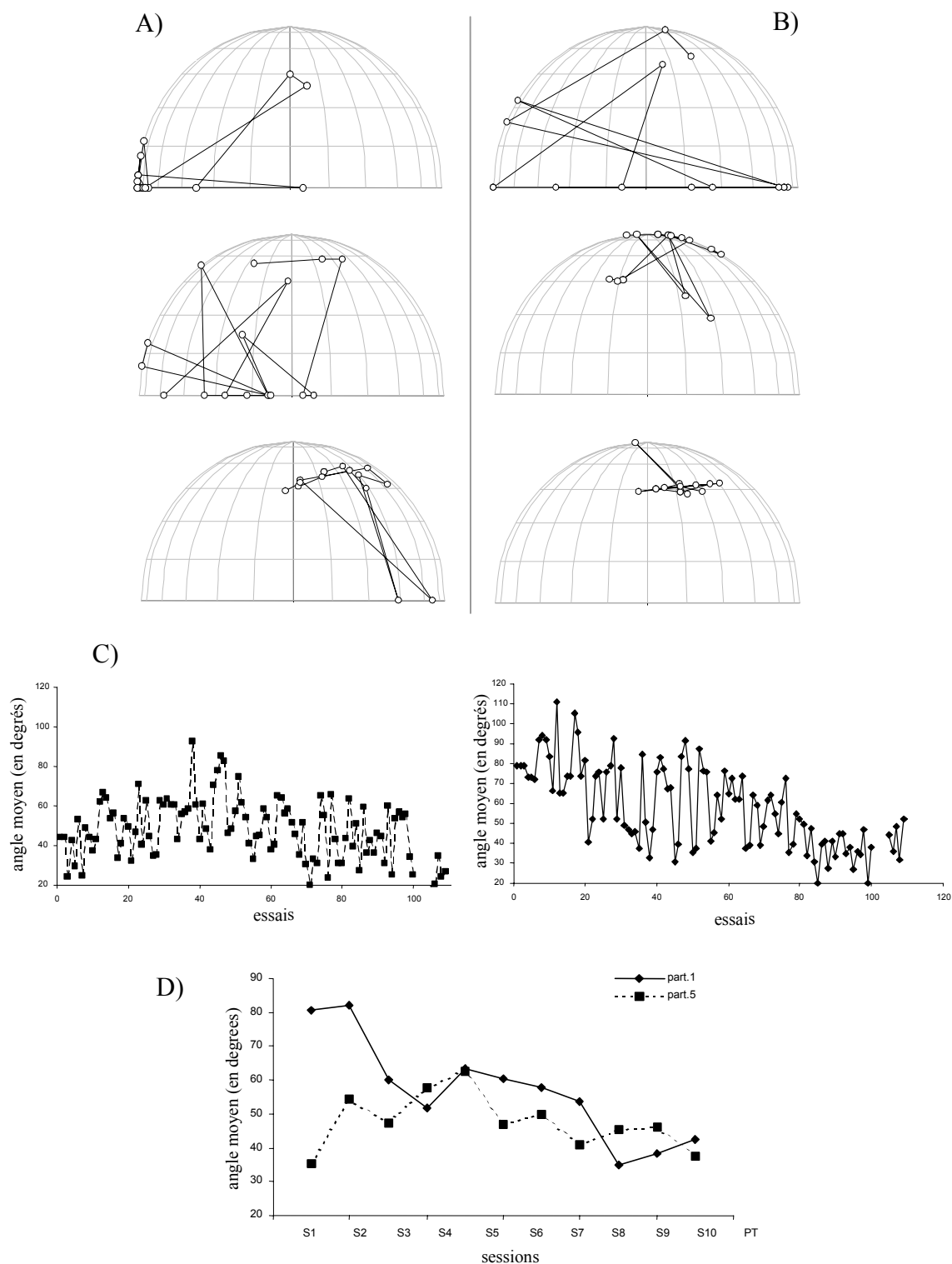


**Figure 24 :** Evolution de l'angle moyen au cours des sessions. Panel A) participants dont l'angle moyen diminue avec la pratique. Panel B) participants dont l'évolution diffère

L'évolution du participant 1 quant à elle reflète celle décrite antérieurement chez les participants 4 et 6. La consistance lors de la première session est très faible, due à une exploration des forçages possible, lors du balancer gauche notamment. Ensuite, le simple forçage se localise autour du point de revirement droit ( $180^\circ$ ), et est utilisé en alternance avec un double forçage. En fonction du nombre d'alternance entre simple et double forçage, la consistance entre les essais varie énormément, notamment entre les essais 40 et 60 (Panel C). Enfin, le forçage double devient très consistant lors des dernières sessions, situé autour de  $20^\circ$  et  $190^\circ$ , amenant une nette diminution de l'angle moyen, situé autour de  $34^\circ$ . Le panel D comparant l'évolution de la consistance des deux participants permet de voir que si le comportement adopté au départ était différent, les participants finissent par adopter tous deux une coordination assez stable, caractérisée par un double forçage juste après les points de revirement.

#### 4. Discussion

Lors de cette expérience, tous les participants ont amélioré l'amplitude des balancers, et convergent tous vers une fréquence autour de 1.2Hz, qui semble optimale (Durand et al., 1994). L'indice de fluidité s'est lui détérioré avec la pratique, mais la variabilité des comportements adoptés peut être responsable de cette augmentation, certains participants (notamment le 7) ayant un comportement moins consistant à la fin de la pratique qu'au début.



**Figure 25:** comparaison de l'évolution des modes de coordinations pour le participant 5 (panel A) et le participant 1 (panel B), lors du 5<sup>ème</sup> essai des session 1 (en haut), 5 (au milieu), et 10 (en bas) ; et de l'évolution de la consistance des coordinations par essais (panel C, à gauche : participant 5, à droite : participant 1), et par sessions (panel D).

En effet dès les premières sessions, deux types de comportements se distinguent : les participants qui adoptent comme prévu un rapport de fréquence en 1:1 et ceux qui

alternent avec un rapport de fréquence de 2 :1. Dans les deux cas, les forçages ont tendance à survenir n'importe où dans le balancer lors de la première session (voir Figure 23, panel A, et figure 25, panel A).

Pour ceux qui sont dès le départ dans une phase d'alternance, la consistance du mouvement est très faible lors des premières sessions (pour les participants 1, 3, 4, 6 et 8). Ensuite, le forçage simple se rapproche des points de revirement, qui vont être également exploités lors du double forçage. Ce double forçage est d'ailleurs utilisé en alternance avec le simple forçage dès la première session chez certains participants (voir Figure 23, panel A). Au cours de la pratique, le double forçage devient de plus en plus présent et prédomine chez tous les participants lors de la dernière session. La consistance du comportement est alors forte (inférieure à 30° pour les participants 3 et 4), indiquant une stabilité relative du comportement.

Pour les participants 5 et 2, les premières sessions sont caractérisées par un forçage simple, d'une consistance assez forte, avec quelques forçages en 2/1, sur quelques cycles seulement. Il faut attendre la deuxième ou troisième session pour que les participants rentrent dans une phase d'alternance entre simple et double forçage, caractérisée par une diminution de la consistance du mouvement. Lors des dernières sessions le double forçage domine malgré quelques cycles réalisés en simple forçage.

Le participant 7 présente quant à lui une évolution particulière. Il faut tout d'abord noter qu'il oscille à une fréquence nettement plus élevée que les autres (voir Figure 22) pendant toute l'expérience. Il ne balancera à la fréquence optimale que lors du post-test. C'est aussi le seul participant à ne pas forcer au niveau des points de revirements, mais autour du passage en verticale basse. Tout au long des sessions, le forçage arrive de plus en plus tôt dans le cycle, laissant penser qu'avec plus de pratique le participant forcerait juste après le point de revirement. A partir de la sixième session, ce double forçage devient majoritaire, mais est accompagné d'une forte diminution de la consistance du comportement. Consistance qui tend à augmenter doucement sur les dernières sessions. Il est possible de penser que le comportement inadéquat adopté ne permet pas une grande stabilité vu la fréquence de mouvement produite.

Dans l'ensemble, tous nos participants n'avaient pas le même niveau de départ par rapport à la tâche demandée. Ceux qui adoptaient uniquement un simple forçage étaient réellement débutants, alors que ceux qui produisaient déjà une alternance en 2 :1 semblaient adopter le comportement correspondant aux sessions 3 ou 4 pour les débutants. La différence dans l'évolution de la consistance du comportement n'existe donc que par le

niveau de départ. Finalement, quelle que soit l'échelle de temps requise, la route adoptée semble être la même pour tous.

Lors des premiers essais, l'adoption par certains participants d'un rapport de fréquence de 1 :1 corrobore notre hypothèse sur le comportement débutant. Par contre, lors de ces mêmes essais, ils adoptent des phases relatives extrêmement instables, alors que l'adoption d'une phase relative fixe était attendue. Cette variabilité de la phase relative chez les débutants a été retrouvée dans l'étude de Vereijken (1991) sur simulateur de ski. Vereijken émettait l'hypothèse que ces phases relatives totalement instables pouvaient provenir d'une stratégie de correction appelée phase slippage, durant laquelle un des oscillateurs rattrape une période par rapport à l'autre oscillateur (Kelso, deGuzman, & Holroyd, 1991). Cette correction interviendrait à un moment donné lorsque la divergence entre la phase de la plateforme et la phase du centre de gravité devient trop grande pour maintenir la performance dans des conditions identiques. La stratégie de correction de phase slippage est alors utilisée, en introduisant par exemple un cycle supplémentaire dans l'une des variables (le centre de gravité dans l'étude de Vereijken). De ce fait, la phase de cet oscillateur est « remise à zéro » (Vereijken, 1991), et peut de nouveau avoir une relation « fixe » avec la seconde variable (la déviation de la plateforme). Ce type de correction intervient lorsque les oscillateurs sont en coordination relative, c'est-à-dire quand chacun garde une tendance à osciller à sa fréquence propre ( en opposition avec la coordination absolue définie par (Von Holst, 1973) comme l'effet magnétique). Cette hypothèse de correction pourrait expliquer l'évolution de nos participants débutants. En effet, ils sont souvent en verrouillage de fréquence (1 :1), mais présentent une variabilité au niveau de la phase relative, avec notamment des glissements vers des phases relatives différentes, que l'on pourrait apparenter au phénomène de phase slippage. Par exemple, l'excursion du participant 5 lors de la première session (voir Figure 25, panel A) vers un double forçage alors qu'il produit clairement un rapport de fréquence en 1/1 dans l'essai, pourrait se traduire par la création de ce cycle supplémentaire au niveau de la distance D, afin de rattraper une période par rapport à l'oscillation de la plateforme et maintenir ainsi la performance. D'après Vereijken, ces phases slippages perturberaient les séries temporelles de la plateforme (en réduisant son amplitude) et du centre de gravité ( en créant des cycles supplémentaires), et pourraient intervenir n'importe où dans le cycle de la plateforme ou du centre de gravité, afin de corriger les divergences, montrant l'absence de points discrets organisants le contrôle du mouvement. Ceci pourrait expliquer pourquoi il est difficile de mettre en avant une coordination stable, préférentielle, lors des tous

premiers essais, alors que très vite les participants exploitent clairement un forçage situé autour des points de revirement.

Cependant, il existe une différence fondamentale entre ces deux études. Dans l'étude de Vereijken, il était aisé de distinguer ce qui avait attiré à la correction de phase, les participants experts comme débutants adoptant un rapport de fréquence de 1 :1 entre les oscillations du centre de gravité et de la plateforme. Ainsi, un rapport de fréquence de 2 :1 allié à une dérive de la phase relative correspondait à une correction de la phase relative de la part du participant afin de préserver par la suite le rapport de fréquence en 1 :1. Dans notre étude, la coordination experte faisant appel à un rapport de fréquence de 2 :1, il s'avère plus difficile de distinguer les corrections des réelles avancées des participants.

Pour Kelso et Jeka (1992), ce phénomène de *phase slippage* prend une autre dimension lorsqu'il intervient dans une période succédant à un régime stable, lors de laquelle le rapport de fréquence qui oscille entre deux entiers sans être exactement sur l'un d'eux. Cette période correspondrait aux comportements des participants débutants lorsqu'ils se rapprochent clairement des points de revirements et qu'ils entrent dans une phase d'alternance entre simple et double forçage, comportement adopté plus tôt par les participants plus « débrouillés » au départ. Dans leur tâche d'oscillation entre quatre membres demandant la production d'un rapport de fréquence différent du 1 :1, ils montrent que le phénomène de phase slippage, combiné à des périodes d'attraction de phase, correspond en fait à une période dite d'*intermittence*, caractéristique générique de système dynamiques proches d'une bifurcation tangente ou bifurcation *saddle-node* (Kelso, deGuzman et al., 1991). Cette région contient en même temps une direction stable (attracteur) et une direction instable (répellant) qui entraîne le système vers une dérive (phase slippage). Ils observent en effet que le système passe du temps autour des états attractifs que sont la phase et l'antiphase (ce qui correspond à un régime bistable), mais s'en éclipse pour partir sur une série de valeurs de phase relative, avant de retourner sur la phase ou l'antiphase. Ici la perte de stabilité permet d'engendrer une transition attendue de type saddle node avec tout d'abord une dérive du point fixe en direction du nouvel état, puis une coexistence de l'attracteur et du répellant qui fusionne pour donner un seul point fixe après la transition (voir Figure 5 en introduction).

Nos résultats, montrant une dérive du forçage initial vers le point de revirement, puis une diminution de la consistance du comportement (synonyme de perte de stabilité) au moment où les participants entrent dans la phase d'alternance entre le 1 :1 et le 2 :1, laissent penser qu'une bifurcation de type *saddle-node* est bien présente, avec une période

d'*intermittence* où les participants alternent entre un comportement instable et un comportement stable, avant de se fixer sur un comportement stable en 2 :1, avec des forçages situés sur les points de revirements. Ceci corrobore l'hypothèse émise par Nourrit et al. (2003) selon laquelle l'apprentissage d'une habileté globale en situation de compétition serait assimilé à une bifurcation de type *saddle-node*, avec un maintien prolongé dans la région de bistabilité où les comportements en simple et double forçage sont disponibles, permettant ensuite l'adoption du comportement expert.

A la fin de l'expérience, les participants « experts » adoptent une coordination relativement stable, qui laisse penser que les perturbations sont absorbées plus progressivement que chez le débutant, avec des actions de correction distribuées tout au long des essais. De plus leur action de correction ne semble pas être accompagnée de perturbations dans les séries temporelles de la plateforme (au niveau de l'amplitude) et du centre de gravité, comme chez les débutants, puisque les coordinations produites sont assez constantes, mais pas rigides. Ainsi, les modes de coordination établis par les experts sont plus stables et plus flexibles. Cette stabilité est indiquée par la relative stabilité de la phase relative entre le participant et l'appareil. La flexibilité peut être inférée par le fait que les perturbations étant distribuées de manière régulière, les corrections peuvent se faire tout au long de l'essai, sans se manifester au niveau macroscopique de la performance. Au contraire les novices ont souvent recours par exemple à une phase slippage drastique, indiquant que le contrôle sur la performance n'a pas encore évolué suffisamment.

En conclusion, cette expérience confirme l'hypothèse émise par Nourrit et al. (2003) sur le simulateur de ski, au niveau des coordinations produites par le sujet. La nature de la transition semble être de type *saddle-node* avec une plus ou moins forte non-linéarité du paramètre de contrôle (difficile à définir quand il s'agit d'apprentissage) en fonction des participants. Il faut noter que dans cette expérience, la phase de bistabilité est plus courte que dans l'expérience de Nourrit et al.(2003), et que certains de nos participants sont directement dans cette phase de bistabilité. Ces résultats montrent comme dans notre étude précédente, l'importance du niveau de départ des participants et du niveau de difficulté de la tâche amenant à une modification plus ou moins rapide du comportement.

Afin de confirmer les résultats de cette expérience, il semble nécessaire de tester les sujets sur une tâche les mettant tous dans une situation réellement nouvelle, pour tenter de diminuer les différences inter-individuelles de niveau lors des premières sessions et pour

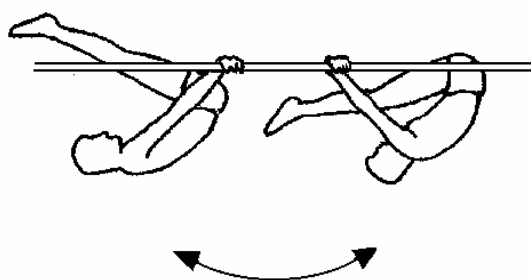
être sûr d'observer le processus d'apprentissage dans son ensemble, sans en négliger aucune étape.

Dans ce même but, il semble important de proposer une tâche sur laquelle de réels experts ayant acquis l'habileté depuis longtemps puissent être testés. Ceci permettra de voir si nos participants ont bien achevé le processus d'apprentissage, ou s'il leur reste encore des modifications comportementales à adopter.

### Expérience 3

#### 1. Introduction

Jusqu'à présent, la seule tâche expérimentale ayant révélé une nette différence qualitative entre le comportement débutant et le comportement expert chez tous les sujets est celle réalisée par Delignières et al. (1998) sur les balanciers en position mi-renversée aux barres parallèles (Figure 26).



**Figure 26** : Tâche expérimentale de balancer en position mi-renversée.

Ces auteurs ont choisi comme variable collective la phase relative entre les oscillations pendulaires du centre de gravité et la distance entre le centre de gravité et la ligne des épaules. Cette variable révèle que tous les débutants adoptent un rapport de fréquence de 1/1 entre ces deux oscillateurs avec une phase relative située autour de  $0^\circ$  (soit un forçage initié au point de revirement avant, défini par l'orientation du corps). Après 80 essais, seule l'amplitude des balanciers a progressé alors que la phase relative n'a quasiment pas évolué hormis pour un participant qui est passé progressivement d'un forçage situé à  $-20^\circ$  à un forçage à  $40^\circ$ . Cette dérive progressive semble entraîner le participant vers un forçage plus efficient, situé à  $90^\circ$  au passage en verticale basse. Ce forçage est par ailleurs adopté par les gymnastes experts testés qui forcent deux fois par cycle, à chaque passage en verticale basse, correspondant à une phase relative de  $90^\circ$  et  $270^\circ$  (voir figure 6 du cadre théorique). Le comportement optimal de cette tâche contraint donc fortement les principes de synchronisation des fréquences mais également des phases, contrairement à l'étude précédente sur la balançoire. Ce comportement est motivé par une exploitation maximale des forces passives du système et par une optimisation de l'efficience (Bernstein, 1967; Sparrow, 1983). Pour agir sur la dynamique du mouvement, le gymnaste doit moduler son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation. Dans cette

étude, un cycle correspondra à un balancer complet. Il présente deux points de revirement, vers l'arrière et vers l'avant, correspondant à l'orientation du corps. Chaque balancer comprend une phase ascendante, durant laquelle le travail de la gravité est résistant et une phase descendante durant laquelle la gravité exerce un travail moteur. Ainsi, l'expert exploite la gravité durant la phase descendante des balancers (correspondant au passage d'un point de revirement à la verticale basse) en augmentant la distance entre le centre de gravité et l'axe de rotation. En contrepartie, il tentera de diminuer les résistances du travail de la gravité durant la phase ascendante en réduisant la distance entre le centre de gravité et l'axe de rotation. Ce principe mécanique se réalise grâce à une ouverture et une fermeture du corps. Il constitue une oscillation verticale du centre de gravité venant se greffer à l'oscillation pendulaire. Révélée par une diminution de la distance entre le centre de gravité et la ligne des épaules, cette fermeture, intervient lors du passage en verticale basse (phase relative de  $90^\circ$  et de  $270^\circ$ ). Dans cette position, la force centrifuge et la vitesse sont à leur maximum, produisant alors un travail contre cette force et apportant ainsi de l'énergie cinétique au système.

Cette tâche comporte donc tous les atouts nécessaires pour tester nos hypothèses sur l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage ; du mode de coordination spontanément adopté lorsque le sujet est confronté à une nouvelle tâche, au mode de coordination adopté par l'expert après des années de pratique. Cependant, l'expérience de Delignières et al. (1998) n'a montré aucune évolution qualitative du comportement, hormis chez un participant, suggérant une grande difficulté de la tâche, et une forte imposition de contraintes. Dans ce cas, la tâche semble en effet davantage contraindre les coordinations que dans les expériences sur le simulateur de ski (Vereijken, 1991; Vereijken et al., 1997) ou sur notre balançoire où les débutants pouvaient forcer le système à n'importe quel moment du cycle. Il semble donc que le poids des contraintes entraîne une persistance des coordinations spontanées tout au long de l'expérience. Pour observer un changement qualitatif des coordinations, il paraît alors nécessaire de réduire ces contraintes, sans changer les principes biomécaniques régissant la tâche. En suspendant une nacelle aux barres, celle-ci devrait supporter le poids des participants, et les dégager ainsi d'une des contraintes majeures de la tâche qui était la portance du poids du corps sur la ceinture scapulaire. Avec ce dispositif, les participants devraient être en mesure d'évoluer vers la coordination experte sans être limités par des problèmes de force musculaire.

Nous faisons alors l'hypothèse que les participants adopteront dans un premier temps un simple forçage situé autour du point de revirement avant ( $0^\circ$  de phase relative). Au fil des sessions, le forçage devrait se rapprocher du passage en verticale basse (décalage de phase de  $90^\circ$  ou de  $270^\circ$ ). Les coordinations devraient entrer dans une phase d'alternance entre le simple et le double forçage, pendant une période assez longue, avant de se fixer sur une coordination consistante en double forçage intervenant au passage en verticale basse, similaire à celle adoptée par les experts « gymnastes ».

## 2. Méthode

### 2.1 Participants

Cinq participants (2 femmes et 3 hommes, âge moyen =24.8 ans, ET=2.04, et de taille moyenne=172 cm, ET=1,2) ont participé volontairement à cette étude. Aucun n'avait d'expérience antérieure aux barres parallèles ni en gymnastique. Les participants ont signé un formulaire de consentement et n'ont reçu aucune rémunération pour cette expérimentation.

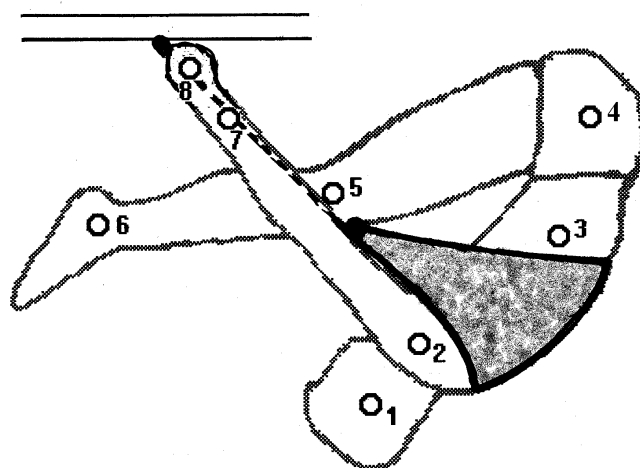
### 2.2 Protocole Expérimental

La tâche a été réalisée au cours de 12 sessions réalisées sur trois semaines consécutives. Chaque session comprenait 8 essais de 20 secondes, entrecoupés de deux minutes de repos. Les participants devaient se positionner dans la nacelle, réglée pour qu'ils aient les bras tendus lors des balancers. Celle-ci leur permettait de se maintenir en équilibre lorsqu'ils étaient en position mi-renversée.

Il leur était demandé de se balancer, jambes tendues, en essayant « d'être le plus fluide possible ». Cette instruction était répétée au début de chaque session, sans aucune autre indication verbale supplémentaire. Trois semaines plus tard, un post-test d'une session a été réalisé.

### 2.3 Recueil des données

Les participants étaient équipés de huit marqueurs réfléchissants placés uniquement sur le côté gauche du corps, considérant la tâche comme symétrique. Les localisations étaient les suivantes (Figure 27) : canal auditif (1), tête humérale (2), jonction entre D12 et L1 (3), grand trochanter (4), genou (5), malléole externe (6), styloïde cubitale (7), 3<sup>ème</sup> métacarpien - 2<sup>ème</sup> phalange (8). 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. Trois autres marqueurs étaient situés sur les barres parallèles (9, 10 et 11) afin de définir le repère formé par l'agrès.



**Figure 27** : Dispositif expérimental avec la localisation des différents marqueurs (voir le texte pour plus de détails).

Les mouvements des marqueurs étaient enregistrés en trois dimensions au moyen d'un analyseur de mouvement VICON 370 (BIOMETRICS) à quatre caméras, à une fréquence d'acquisition de 50Hz. Lors de chaque essai, l'enregistrement était initié à la fin du premier balancer produit par le participant.

### 2.4 Analyse des données

Les données se présentaient sous forme de séries temporelles tridimensionnelles ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), pour chaque marqueur. Pour commencer, une rotation du repère a été effectuée de manière à aligner l'axe des  $y$  sur la droite définie par les positions moyennes des marqueurs 9 et 10 (définissant l'axe transversal des barres).

Faisant l'hypothèse que les informations principales liées aux mouvements de la balançoire et aux coordinations produites se situeraient dès lors dans le plan transversal, 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.

#### 2.4.1 Variables de performance

Premièrement, la série temporelle de l'angle  $\beta$  défini par l'axe centre de gravité/main (point de rotation) et l'axe vertical a été calculée. 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). L'angle obtenu représente l'amplitude instantanée de déviation du centre de gravité par rapport à sa position de repos. Cette série temporelle a été utilisée de la même manière que dans l'expérience précédente pour obtenir les valeurs moyennes d'amplitude, de fréquence et de fluidité de l'angle  $\beta$ .

#### 2.4.2 Phase Relative

La distance instantanée ( $D$ ) entre les épaules et le centre de gravité a ensuite été calculée. La phase relative entre  $\beta$  et  $D$  a alors été calculée par la méthode de l'estimation ponctuelle, selon la formule suivante :

$$PR = \frac{TD - T\beta_n}{T\beta_{(n+1)} - T\beta_n} \times 360^\circ$$

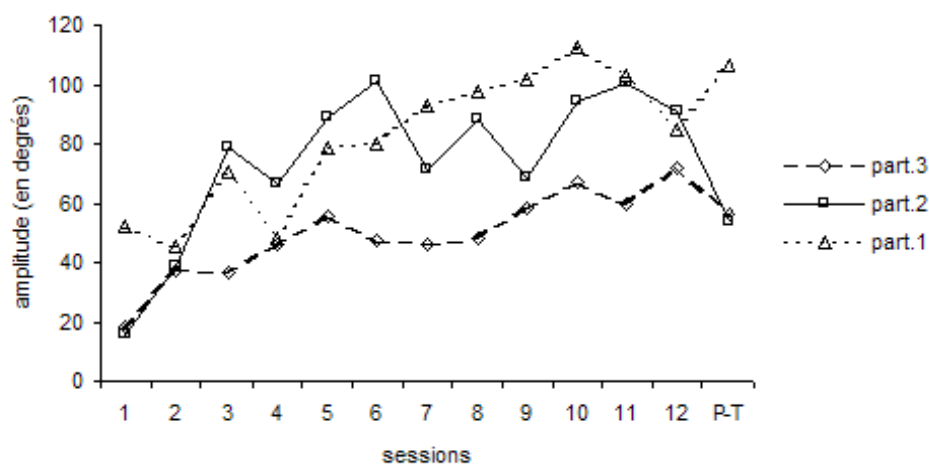
Cette phase relative discrète correspond à la valeur de la phase de l'angle  $\beta$  lorsque le forçage est initié au cours de chaque cycle.

### 3. Résultats

#### 3.1 Evolution de l'amplitude des balancers

La Figure 28 montre une évolution de l'amplitude des balancers, qui double chez tous les participants avec la pratique. En revanche, seule l'amplitude des balancers du

participant 1 n'est pas détériorée au cours du post-test. Les deux autres participants présentent une réduction importante de l'amplitude des balancers lors de ce post-test.

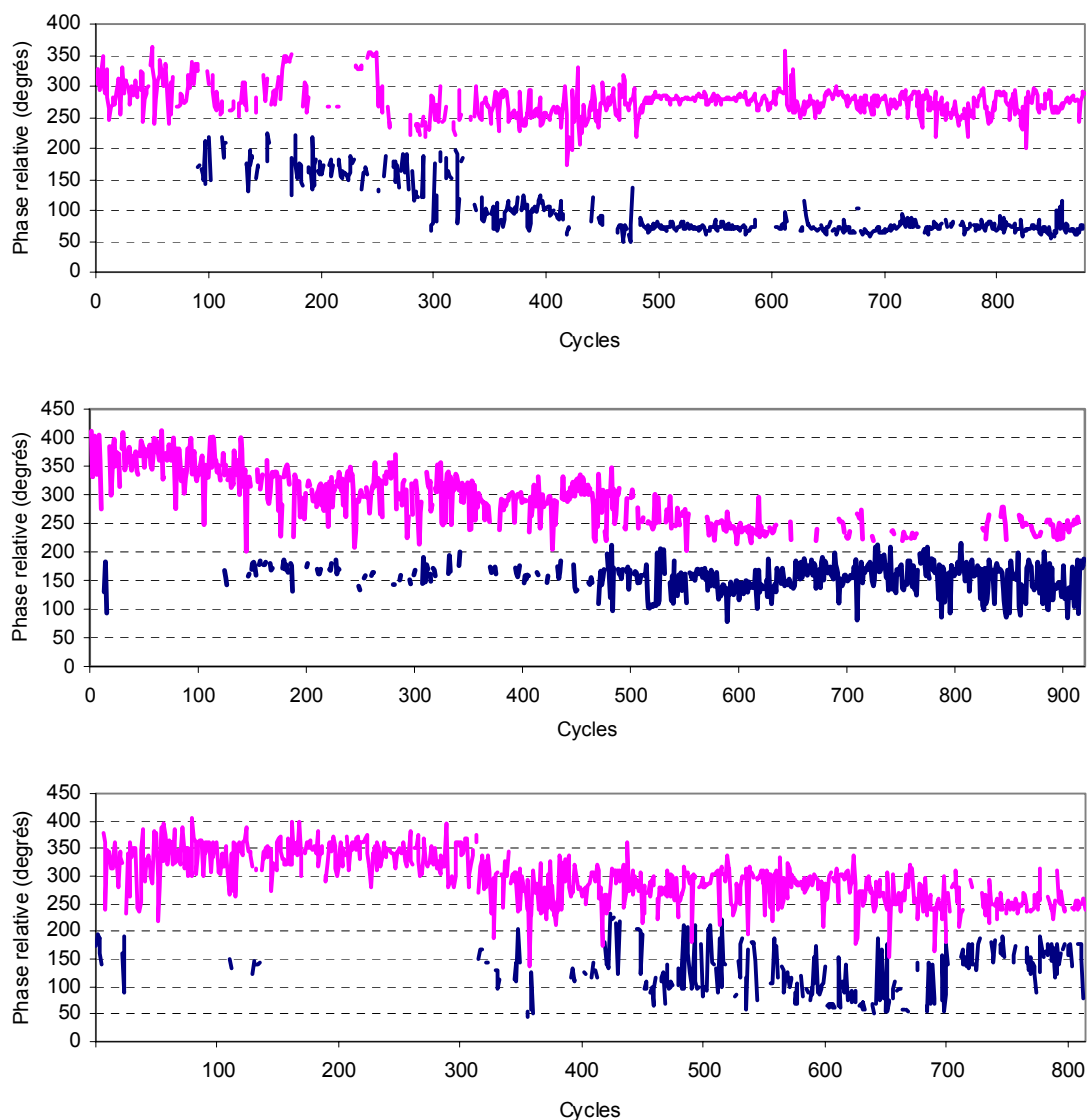


**Figure 28** : Evolution individuelle de l'amplitude des balancers (en degrés) au cours des différentes sessions de pratique.

### 3.2 Evolution des modes de coordination

Les graphiques présentés ici représentent l'évolution de la phase relative de cycle en cycle. L'homogénéité des coordinations adoptées entre les essais et les sessions permet en effet de concaténer l'ensemble des données sous la forme d'une seule série temporelle exprimant l'évolution cycle-à-cycle de chaque participant tout au long de la pratique. En moyenne, un essai comprend 8 à 9 cycles selon les participants. Une session comprend ainsi de 64 à 72 cycles.

La Figure 29 représente donc l'évolution des phases relatives adoptées par les participants au cours de chaque cycle ou balancer. Le premier comportement adopté est similaire pour tous les participants : ils injectent de l'énergie dans le balancer juste avant le point de revirement arrière (i.e. à des valeurs de phase relative situées autour de  $350^\circ$ ). Ce comportement perdure assez longtemps même si une certaine variabilité est observée. Par la suite, la phase relative dérive de  $350^\circ$  vers  $270^\circ$  chez tous les participants, avec une variabilité moindre qu'au départ. Le deuxième forçage, initié lors du balancer avant, est introduit par les participants après un minimum de 100 cycles de pratique (voire 300 pour le participant 3).



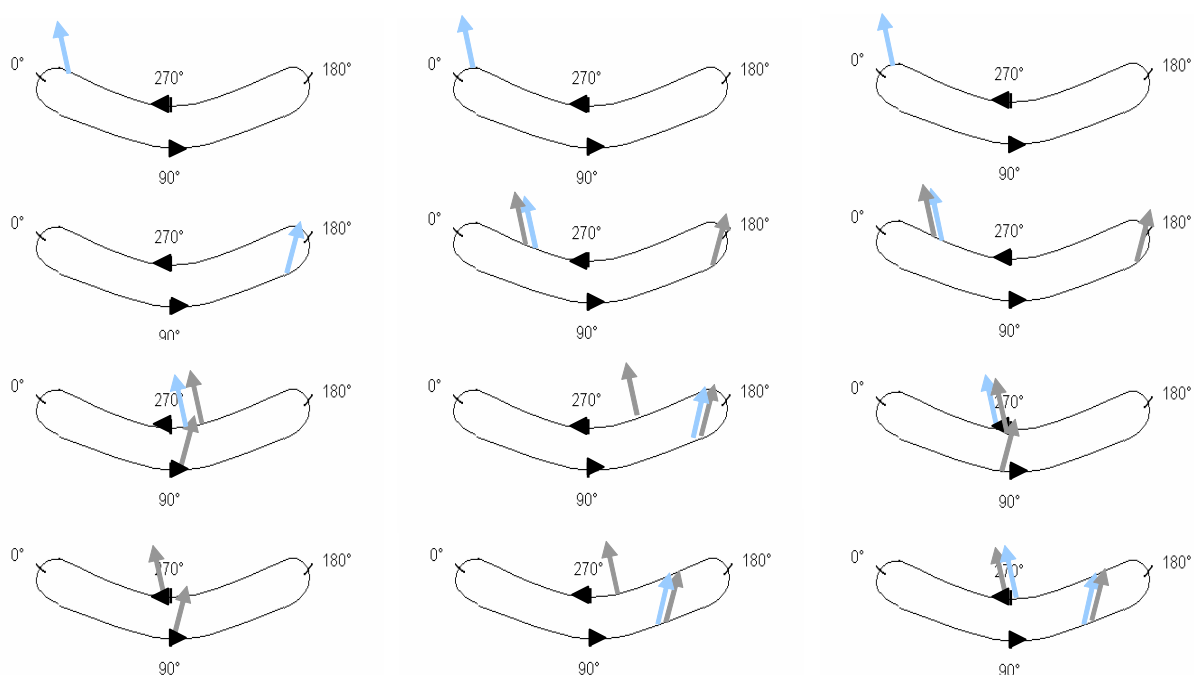
**Figure 29** : Evolution de la phase relative des deux forçages (en bleu : forçage initié lors du balancer arrière, en rose : forçage initié lors du balancer avant) au cours des cycles (balancers) réalisés pendant la pratique pour le participant 1 (en haut), le participant 2 (au milieu) et le participant 3 (en bas).

Tous adoptent un forçage situé juste avant le point de revirement avant. De la même manière que le premier forçage, celui-ci va dériver pour être initié au passage en verticale basse lors du balancer avant (PR de  $90^\circ$ ) avec une variabilité finale moindre, et ce uniquement chez le participant 1. Pour le participant 2, cette dérive semble s'amorcer à partir du 800<sup>ème</sup> cycle où la variabilité de ce second forçage augmente tout en s'éloignant très progressivement du point de revirement. Enfin, le 3<sup>ème</sup> participant a une évolution plus lente de son comportement par rapport aux deux autres. Son second forçage semble se stabiliser légèrement vers la fin des sessions d'apprentissage autour d'une phase relative de  $140^\circ$  ou  $150^\circ$ . Néanmoins, aucun de ces deux participants ne produit de comportement

aussi stable que le participant 1 à la fin des 12 sessions d'apprentissage et du post-test (représenté par les 45 derniers cycles des différents graphiques).

### 3.2.1 Schématisation des comportements observés

La Figure 30 résume les principaux comportements adoptés par les participants au cours des diverses sessions de pratique. Le premier comportement est identique pour tous, situé juste avant le point de revirement arrière (PR de  $350^\circ$ ). Par la suite, le participant 1 adopte un nouveau forçage simple situé à l'opposé vers le point de revirement avant, qui lui permet par la suite d'utiliser ces deux forçages lors d'un même cycle. Ce double forçage est alors utilisé en alternance avec le premier forçage, qui a été avancé pour être initié juste avant le passage en verticale basse (PR de  $250^\circ$ ). Il en était de même pour le deuxième forçage, qui lui était initié juste après le passage en verticale basse (PR de  $100^\circ$ ). Enfin lors des derniers essais, ce participant produit un double forçage relativement stable situé au passage en verticale basse.



**Figure 30** : Schématisation des différents forçages adoptés au cours de l'apprentissage chez le participant 1 (à gauche), le participant 2 (au milieu) et le participant 3 (à droite). Les flèches représentent l'initiation du forçage au cours du balancer schématisé par sa phase, où le  $0^\circ$  correspond au point de revirement arrière.

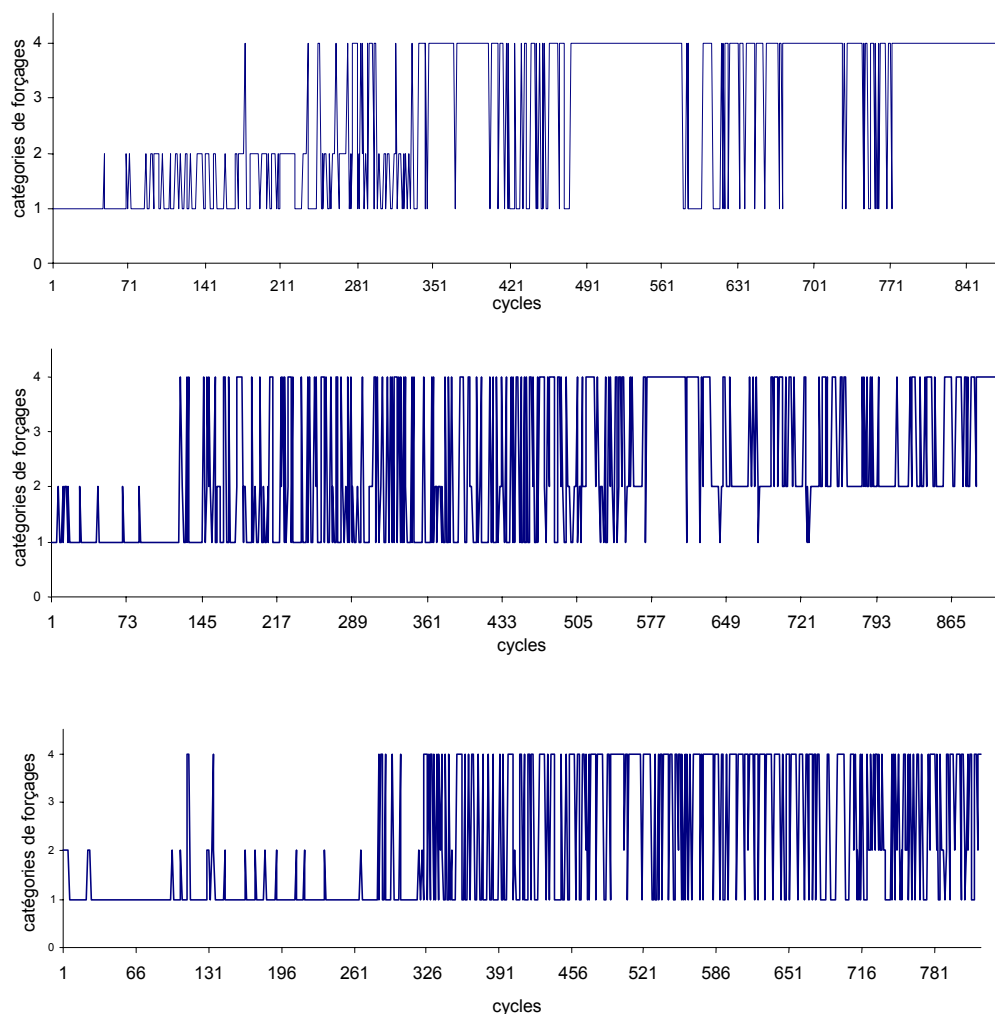
Les participants 2 et 3 ont une évolution similaire lors des deux premiers comportements adoptés. Ils utilisent en alternance un simple forçage (PR de  $300^\circ$ ) et un double forçage (PR de  $300^\circ$  et de  $170^\circ$ ). Par la suite, le participant 2 continue à alterner simple et double forçage en se basant en revanche sur un simple forçage qui se produit lors du balancer avant (PR entre  $140^\circ$  et  $160^\circ$ ). Parallèlement, on observe une dérive des moments de forçage qui se rapprochent du passage en verticale basse.

Enfin, le comportement du participant 3 est différent du participant 2. En effet, celui-ci reste plus longtemps dans une phase où il alterne double forçage et simple forçage localisé dans la partie arrière du balancer. De façon surprenante, un comportement éphémère correspondant au comportement expert apparaît durant quelques essais où le participant produit un double forçage localisé aux passages en verticale basse. Ensuite, le participant revient dans une phase d'alternance entre double forçage (PR de  $150^\circ$  et de  $270^\circ$ ) et simple forçage, caractérisé par l'un ou l'autre des forçages (soit du  $150^\circ$  soit du  $270^\circ$ ).

### 3.2.2 Catégorisation des forçages utilisés

Afin d'observer la phase d'alternance, les comportements adoptés par les participants ont été catégorisés. Un simple forçage produit lors du balancer avant (décalage de phase compris entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$ ) est classifié comme un forçage de type 2. A l'inverse, un simple forçage qui se produit lors du balancer arrière (phase relative comprise entre  $180^\circ$  et  $360^\circ$ ) est catégorisé comme un forçage de type 1. Enfin, les doubles forçages sont labellisés sous forme de forçages de type 4. La Figure 31 montre que chez le participant 1, seul le simple forçage, caractérisant un rapport de fréquence de 1 :1, est utilisé lors des 200 premiers balancers réalisés. Après plus de 70 balancers (ou cycles), le forçage localisé lors du balancer arrière (catégorie 1) bascule à un forçage localisé lors du balancer avant (catégorie 2). Le participant rentre ensuite dans une phase d'alternance entre simple et double forçage, avant de stabiliser après 500 balancers de façon majoritaire sur une coordination en double forçage.

Pour le participant 2, la première phase de simple forçage est de plus courte durée et uniquement caractérisée par un forçage survenant lors du balancer arrière. La phase d'alternance intervient après une centaine de balancers. Il y a chez ce participant deux périodes nettes dans la phase d'alternance, une première où le participant s'appuie sur un simple forçage qui se produit lors du balancer arrière et une deuxième phase, intervenant après 500 balancers où le simple forçage utilisé se situe dans le balancer avant.



**Figure 31:** évolution des forçages catégorisés durant des balancers successifs réalisés au cours de la pratique pour le participant 1 (en haut), le participant 2 (au milieu), et pour le participant 3 (en bas).

Enfin, le comportement du participant 3 est caractérisé par une première période extrêmement longue (250 balancers). Durant celle-ci, il n'utilise qu'un simple forçage localisé dans le balancer arrière, avec quelques forçages localisés dans le balancer avant. Ensuite, une première phase d'alternance est observée où le simple forçage utilisé est localisé au balancer arrière (du balancer 326 au 500<sup>ème</sup> balancer), suivie d'une phase lors de laquelle le simple forçage se situe soit durant le balancer avant soit durant le balancer arrière, qui commence cependant à être moins utilisé.

#### 4. Discussion

Cette étude avait pour but de vérifier l'existence d'une phase d'alternance entre le comportement débutant et le comportement expert dans une tâche totalement nouvelle pour les participants et permettant une comparaison avec des participants ayant une réelle expertise dans l'habileté à réaliser.

Les premiers résultats obtenus suggèrent la similitude des coordinations spontanées chez nos trois participants. Comme dans l'étude de Delignières et al. (1998) où les participants n'étaient pas soutenus par une nacelle, les participants adoptent un premier forçage situé autour du point de revirement arrière. La plupart du temps, ce forçage est situé juste avant ce revirement (PR d'environ  $350^\circ$ ). Ce forçage est évidemment contre productif mais semble être le seul adoptable au début de la pratique.

La différence majeure obtenue dans cette étude en comparaison à celle de Delignières et al. (1998) est que ces coordinations spontanées ont évolué assez rapidement. En effet, après 80 essais, les participants de l'expérience précédente n'avaient toujours pas changé de mode de coordination, à part l'un des participants qui semblait progressivement retarder son forçage vers le milieu du balancer avant. Au contraire, tous nos participants tendaient à avancer leur forçage vers le milieu du balancer arrière. Une dérive de la coordination spontanée est observée, comme attendue, pour préparer la période d'alternance mais le sens de celle-ci était inattendu. Une nouvelle fois, la consistance dans l'évolution des comportements adoptés lors des premières sessions prouve que cette tâche canalise plus le comportement que l'expérience sur la balançoire, tout en permettant une évolution dans l'espace de travail que la tâche de Delignières et al. (1998) ne permettait pas. L'exploration de l'espace de travail est donc moindre que dans notre étude précédente, et la canalisation du comportement semble nécessiter moins de phase de correction.

L'observation de la dérive ou *phase slippage* (Kelso & Jeka, 1992) de ce premier comportement stable ( $350^\circ$ ) vers un forçage moins stable situé autour de  $270^\circ$  est très net (cf Figure 27). Elle amène les participants à entrer dans une période d'alternance cycle à cycle (cf Figure 29) entre ce forçage simple et un double forçage utilisant le  $270^\circ$  et un autre forçage localisé dans le balancer avant. Les caractéristiques de cette études sont identiques à celle de l'expérience précédente, et donc génériques d'un système dynamique proche d'une bifurcation tangente ou bifurcation *saddle-node* (Kelso, deGuzman et al., 1991), c'est-à-dire une dérive du point fixe (PR de  $350^\circ$ ) en direction du nouvel état (PR de  $270^\circ$ ), puis une coexistence de l'attracteur (PR de  $350^\circ$ ) et du repellant (PR de  $90^\circ/270^\circ$ ),

ou période d'*intermittence*, qui fusionnent pour donner un seul point fixe après la transition (PR de  $90^\circ/270^\circ$ ). L'évolution du comportement tout au long de la pratique, puis la stabilité du comportement en 2 : 1 finalement adopté par le participant 1 après une période d'alternance entre simple et double forçage, exprime clairement cette transition de type *saddle-node* où attracteur et repellant ont fusionné après une phase d'*intermittence* pour ne plus laisser qu'un seul point fixe.

Les deux autres participants sont eux toujours dans cette période d'alternance, et n'ont pas stabilisé le 2<sup>ème</sup> forçage simple avant d'entrer dans la phase d'alternance. Le participant 1 (cf Figure 28) a en effet dérivé son forçage à  $350^\circ$  vers le  $270^\circ$ , mais a également cherché à stabiliser le 2<sup>ème</sup> forçage simple et à le dériver avant d'entrer dans la phase d'alternance. Les deux autres participants ont eux uniquement dérivé le 1<sup>er</sup> forçage pour entrer en phase d'alternance. Au cours de cette période, le participant 2 dérive peu à peu ce second forçage vers le passage en verticale basse. Mais lors de la 12<sup>ème</sup> session, son forçage est encore situé à  $140^\circ$  de PR, ce qui l'amène à réaliser son second forçage de manière très rapide puisqu'il est localisé à  $250^\circ$  de PR. Les réorganisations corporelles alors exécutées à vitesse très élevée pourraient conduire à une certaine instabilité qui inciterait le système à retourner dans son état le plus stable caractérisé par un simple forçage. De plus, au début de cette période d'alternance, le forçage situé autour de  $270^\circ$  semblait être le plus stable, alors qu'à la fin de l'expérience le participant optait pour le forçage autour de  $140^\circ$  de PR. Il est possible de penser que le participant 2 sortira de cette phase d'alternance une fois qu'il aura réussi à avancer un peu plus son forçage dans le balancer avant, autrement dit réaliser cette dérive vers la bifurcation.

Enfin le troisième participant semble suivre exactement la même route que le participant 2 mais de façon un peu plus lente, puisque lors de la phase d'alternance des dernières sessions, ce participant s'appuie de façon majoritaire sur le simple forçage situé dans le balancer arrière. Ces dernières coordinations adoptées par les participants sont stables puisqu'il n'y a pas de différence entre leur comportement adopté à la 12<sup>ème</sup> session et au post-test (représenté par les 45 derniers cycles de chaque graphique).

Cette expérience permet de conclure que l'apprentissage d'une habileté mettant en jeu l'ensemble des segments corporels et nécessitant des réorganisations qualitatives, semble être un processus caractérisé par une bifurcation de type *saddle-node*, intégrant une période d'*intermittence*. De plus, la comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par les experts dans la tâche de Delignières et al. (1998) permet d'affirmer que le participant 1 a appris et adopté réellement le comportement expert, et non un quelconque comportement

intermédiaire, puisque tous les experts adoptaient une coordination similaire, caractérisée par un double forçage à  $90^\circ$  et  $270^\circ$  de PR.

Enfin, cette expérience aura permis de montrer que les contraintes de la tâche (Newell, 1986) jouent un rôle prépondérant sur la possible homogénéité ou variabilité des coordinations spontanément adoptées par des débutants sur une nouvelle tâche. Dans ce cas, les fortes contraintes de la tâche ne permettent pas aux participants d'entrer dans des phases d'exploration comme dans l'expérience précédente sur la balançoire. Dans cette situation de tâche contraignante, les contraintes organiques liées au participant, à ses expériences passées, semblent plus jouer un rôle sur la rapidité de l'évolution de ces coordinations spontanées, que dans l'adoption de coordinations différentes. Ceci expliquerait le fait que tous les participants ne soient pas arrivés au même stade du processus tout en adoptant une route relativement similaire. Les contraintes de la tâche semblent ainsi pouvoir réduire voire annihiler les différences inter-individuelles au début de l'apprentissage sans pour autant empêcher la diversité des échelles de temps d'observation du processus en fonction des caractéristiques des participants.

Cette expérience, ainsi que celle réalisées antérieurement ont fait appel à des tâches relativement contraignantes, notamment au niveau biomécanique, limitant les possibilités d'action des participants. Ce troisième chapitre a donc pour objectif de vérifier si l'allègement des contraintes de la tâche modifie ou non le processus d'apprentissage. En d'autres termes, le fait d'observer une bifurcation de type *saddle-node* lors de l'apprentissage est-il un artéfact dû à une canalisation trop forte des coordinations imposées par la tâche, ou cette transition se retrouve-t-elle quelles que soient les contraintes imposées au départ ?

---

*Chapitre IV : Contraintes et nature de la transition**Expérience4***1. Introduction**

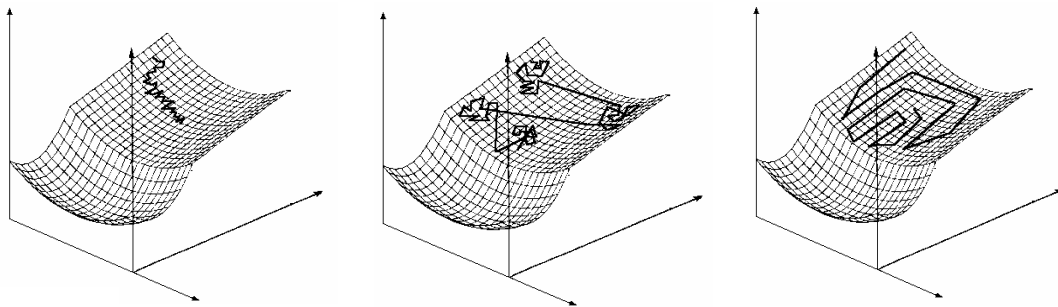
Les résultats obtenus sur différentes tâches s'accordent tous sur le fait que les experts tendent à adopter des comportements similaires (Corbetta & Vereijken, 1999; Delignières et al., 1998; Newell, 1991; Temprado et al., 1997), au-delà de leur différence de style. Cette coordination, qui s'installe au cours de la pratique, est généralement interprétée comme reflétant l'adaptation optimale par rapport aux contraintes de la tâche.

En revanche, l'adoption de coordinations similaires chez les débutants est plus controversée. Face à une nouvelle tâche, adoptent-ils tous le même comportement ou exploitent-ils diverses stratégies variant d'un individu à l'autre ?

L'hypothèse issue des théories dynamiques incite à penser que les débutants devraient tous adopter la même coordination spontanée et la même route d'apprentissage. En effet, cette approche postule que la coordination émerge de l'interaction des multiples contraintes caractérisant le couplage entre la tâche et l'organisme (Kelso, 1995 ; Newell, 1986). Ainsi, seule une légère variabilité inter-participant est possible, à partir du moment où les participants ont une dynamique intrinsèque identique. Cette hypothèse est vérifiée par l'expérience de Delignières et al. (1998) aux barres parallèles, ou encore par l'expérience de Nourrit et al.(2003) sur le simulateur de mono-ski, qui montrent toutes deux une synchronisation des phases et des fréquences chez les débutants.

Cependant, une autre lecture de ces résultats est possible, en les considérant non comme une loi générale de l'apprentissage mais plutôt comme un cas particulier de ce processus. En effet, selon (Newell et al., 1989), l'apprentissage se conçoit comme une recherche continue de solutions par rapport au problème moteur posé, à l'intérieur de l'espace perceptivo-moteur de travail, qui est généré par la combinaison des contraintes de l'apprenant, de la tâche et de l'environnement. Cet espace, défini comme un champ dynamique composé de gradients et de régions d'équilibre, possède des propriétés dynamiques qui guident l'apprenant vers les régions d'équilibre du champ. Newell et ses collègues définissent la route que l'apprenant utilise pour explorer l'espace de travail et localiser les régions stables comme une « stratégie de recherche ». Selon ce principe d'exploration et de recherche, il est donc possible que les débutants adoptent des coordinations différentes dès le début de l'apprentissage. En référence à l'article pionnier de (Gel'fand & Tsetlin, 1962), Newell et al. (1989) distinguent plusieurs stratégies

d'exploration, incluant la méthode aveugle, durant laquelle divers points de l'espace de travail sont testés successivement dans un ordre plus ou moins aléatoire, ou la méthode de recherche locale, utilisant par exemple un gradient dans l'espace de travail pour s'approcher progressivement d'une région stable, ou encore la méthode mixte combinant ces deux types de stratégies (Figure 32).



**Figure 32** : les différentes stratégies de recherche dans l'espace de travail perceptivo-moteur : stratégie locale (à gauche), stratégie mixte (au centre), stratégie non-locale ou aveugle (à droite)

Quelques études ont obtenu des résultats consistants par rapport à ce point de vue. Par exemple, les premiers essais des participants de l'expérience de Vereijken (1991) sur le simulateur de ski, ou ceux de nos participants sur la balançoire peuvent s'inscrire dans une recherche à l'aveugle, lors de laquelle les participants testent les différentes coordinations possibles, avant de se fixer autour d'une région stable de l'espace de travail. L'expérience de Durand et al. (1994), analyse l'évolution de l'amplitude et de la fréquence des oscillations sur le simulateur de ski et met en avant le fait que les participants adoptent lors des premiers essais des fréquences d'oscillations très variables. Certains oscillent à forte fréquence quand d'autres oscillent lentement. Ces résultats ont été interprétés comme révélant l'adoption de stratégies différentes pour explorer l'espace de travail perceptivo-moteur, permettant progressivement à tous les participants de tendre vers la même fréquence d'oscillation, représentant le comportement le plus efficace (Delignières et al., 1996). Cette théorie, pourtant basée sur les mêmes principes dynamiques que la précédente, met l'accent sur la possible existence de différences inter-individuelles dans les stratégies adoptées pour explorer l'espace de travail et donc dans les coordinations adoptées.

Au-delà d'une apparente divergence entre ces deux théories, il semble possible de les réconcilier en considérant le niveau de contraintes imposé par la tâche étudiée. Les tâches démontrant une forte similitude de comportement chez les débutants (Delignières et al., 1998; Nourrit et al., 2003) étaient fortement contraintes, ce qui laisse supposer qu'elles

réduisaient sévèrement l'éventail de comportements possibles (Newell, 1986). Dans l'expérience des barres parallèles, la position requise était tout à fait inhabituelle, et posait d'inévitables problèmes d'équilibre. L'expérience sur le simulateur de ski modifié en mono-ski, dans laquelle les deux supports originaux permettant l'indépendance des pieds ont été remplacés par un seul support de 30cm de large, rendait l'équilibre instable lors des oscillations sur le plan sagittal. A l'inverse, l'expérience de Durand et al. (1994), réalisée sur la version originale plus confortable, semblait moins contraignante, offrant plus de possibilités aux participants d'adopter différentes stratégies. Notre expérience sur ce même simulateur confirme ce résultat et montre par ailleurs que les participants, sur cette tâche moins contraignante, sont capables d'évoluer plus rapidement dans cet espace de travail.

En d'autres termes, certaines situations d'apprentissage génèrent un espace de travail hautement contraint, dirigeant le comportement des apprenants, dès les premiers essais, vers une sorte de solution obligatoire. A l'inverse, d'autres tâches offrent un espace de travail moins restrictif, permettant au début de la pratique l'adoption de diverses solutions comportementales, et l'exploitation de différentes stratégies pour découvrir la solution optimale.

Le but de cette étude est donc d'analyser l'évolution des coordinations adoptées par les novices sur une tâche moins contraignante que celles précédemment testées, afin de tester si la route d'apprentissage reste la même que celle empruntée dans nos études précédentes (i.e. bifurcation *saddle-node*, phase d'alternance), ou si la nature du processus varie en fonction du niveau de contraintes imposé.

Lors de notre expérience sur les barres parallèles, la diminution des contraintes liées à l'organisme (i.e. poids du corps), permettait aux participants de dépasser leur première coordination beaucoup plus rapidement que lorsque cette contrainte était forte (comme dans l'expérience de Delignières et al., 1998). Cependant, le fait que les participants confrontés à un fort niveau de contrainte n'aient pas évolué ne permet pas de savoir si la différence dans l'évolution du comportement est simplement due à une échelle de temps différente liée à la difficulté de la tâche, ou si cette variation de difficulté engendre une évolution du comportement divergente.

Au vu des résultats de notre expérience sur les oscillations latérales sur la balançoire, lors de laquelle une évolution similaire des comportements a été observée (en admettant le fait que les différences lors des premières sessions sont dues à des niveaux d'entrée différenciés dans la tâche), diminuer les contraintes de cette tâche semble une

solution pertinente pour tester les frontières de validité de notre hypothèse sur la nature de l'apprentissage.

Dans cette tâche, la contrainte qui semble la plus effective est celle de la gestion de l'équilibre. Les participants sur la balançoire étaient contraints notamment par la faible largeur de la plateforme (25cm) qui limitait leur polygone de sustentation (délimité par les points de contact entre le corps et la plateforme). Plus la surface de ce polygone est exiguë, plus l'équilibre est précaire. Pour réagir aux perturbations liées aux oscillations, les participants devaient adopter des stratégies posturales très actives de charge et de décharge entre les pieds droits et gauches (Fung, Henry, & Horak, 1995), afin de maintenir la projection du centre de gravité à l'intérieur de ce polygone, et donc de limiter ses déplacements. Ces phases de charge et de décharge créent donc un large glissement du centre de pression (Fung et al., 1995). A l'inverse, une position pieds écartés permet une augmentation de la surface du polygone de sustentation, permettant à la projection du centre de gravité de se situer toujours à l'intérieur des limites de stabilité. La résistance aux perturbations est donc plus facile avec les pieds écartés, et la contribution du système neuro-musculo-squelettique au maintien de la stabilité et de l'équilibre devient plus passive par rapport à une posture avec les pieds plus serrés (Henry, Fung, & Horak, 2001)

De plus, les larges déplacements du centre de gravité dans la position pieds serrés utilisée dans l'expérience précédente sur la balançoire, sont aussi dus aux contraintes musculo-squelettiques du mouvement dans le plan frontal, comme le faible bras de levier de l'articulation de la cheville, qui limite la production de couplages de correction avec les hanches, ou comme le manque de mouvement de l'articulation du genou dans le plan frontal. Ces contraintes engendrent obligatoirement un mouvement plus grand des hanches et/ou du tronc durant les phases de correction. Le fait que les mouvements requis se situent dans l'axe médio-latéral ajoute encore des contraintes supplémentaires. En effet, la faible largeur des pieds fait que les moments générés par la rotation sur les bords médians et latéraux sont beaucoup plus faibles dans le sens médio-latéral alors que dans le sens antéro-postérieur, la plantiflexion et dorsiflexion des pieds permettent de gérer les mouvements du centre de pression. Ainsi, pour de faibles perturbations antéro-postérieures, ces actions des chevilles suffisent à contrôler l'équilibre. Dès qu'elles augmentent, une stratégie de flexion des hanches intervient pour permettre le déplacement du centre de gravité (Horak & Nashner, 1986). En revanche, dans le sens médio-latéral, seules les stratégies d'abduction/adduction des hanches entrent en jeu pour charger et décharger les membres afin de contenir le centre de gravité entre les deux pieds (Winter,

1995; Winter, Prince, Franks, Powell, & Zabjick, 1996), laissant ainsi moins de stratégies d'action possibles pour gérer la posture.

Cette tâche d'oscillation sur balançoire devrait donc moins contraindre les possibilités d'action si l'on permet aux participants d'avoir les pieds plus écartés et d'osciller dans le sens antéro-postérieur. La tâche ainsi modifiée garde les mêmes principes mécaniques (i.e. double forçage au niveau des points de revirement pour obtenir un mouvement efficient), mais impose un niveau de contraintes moindre que dans l'expérience d'oscillation latérale. Les participants auront ainsi une gestion de leur posture beaucoup plus passive et plus fluide, leur permettant de se centrer d'avantage sur l'entretien des oscillations, avec la possibilité de mettre en jeu plus d'articulations, et d'adopter ainsi différents modes de coordination.

Dans cette expérience, il a donc été demandé aux participants d'osciller, pieds écartés (d'environ 30 cm), d'avant en arrière, et ce de la manière la plus fluide possible. Le comportement optimal attendu correspondait à un double forçage situé juste après les points de revirement, et révélé par l'évolution de la distance entre le centre de gravité et la plateforme (voir l'étude 2 pour une analyse biomécanique de la tâche). En revanche, nous nous attendons à observer une plus grande diversité des comportements lors des premières sessions.

## **2. Méthode**

### **2.1 Participants**

Six participants masculins (âge moyen=26.3 ans, ET=2.3) ont participé volontairement à cette étude. Aucun n'avait d'expérience sur la tâche expérimentale ou d'expertise dans des activités présentant des similarités comme le skate-board, le ski ou la gymnastique. Tous ont signé un formulaire de consentement et n'ont reçu aucune rémunération pour leur participation.

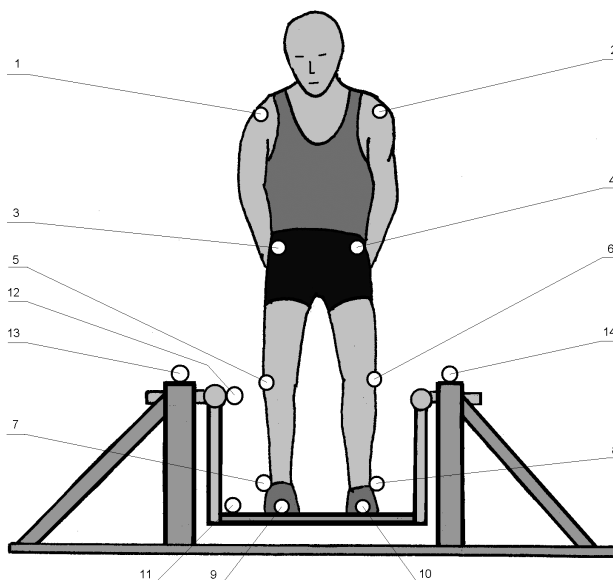
### **2.2 Protocole Expérimental**

La tâche a été réalisée durant 5 sessions, échelonnées sur cinq jours consécutifs. Chaque session comportait dix essais de quinze secondes, avec une minute de repos entre les

essais. Les participants devaient se positionner sur la plateforme 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 répétée 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.

### 2.3 Recueil des données

Les participants étaient équipés de dix marqueurs réfléchissants (Figure 33), 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. Deux autres marqueurs étaient situés aux extrémités d'une des barres métalliques (11 et 12) afin de mesurer le déplacement angulaire de la plateforme par rapport à l'axe vertical. Enfin, deux marqueurs (13 et 14) étaient fixés au sommet des portants droit et gauche, afin de définir l'axe transversal de l'appareil.



**Figure 33** : Positionnement des différents marqueurs passifs pour l'analyse du mouvement (voir le texte pour plus de détails)

Les mouvements des marqueurs étaient enregistrés en trois dimensions au moyen d'un analyseur de mouvement VICON 370 (BIOMETRICS) à quatre caméras, ayant une

fréquence d'acquisition de 50Hz. L'enregistrement était initié, lors de chaque essai, à la fin du premier balancer produit par le participant.

## 2.4 Analyse des données

De manière identique aux expériences précédentes, une rotation du repère a été effectuée, 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.

### 2.4.1 Variables de performance

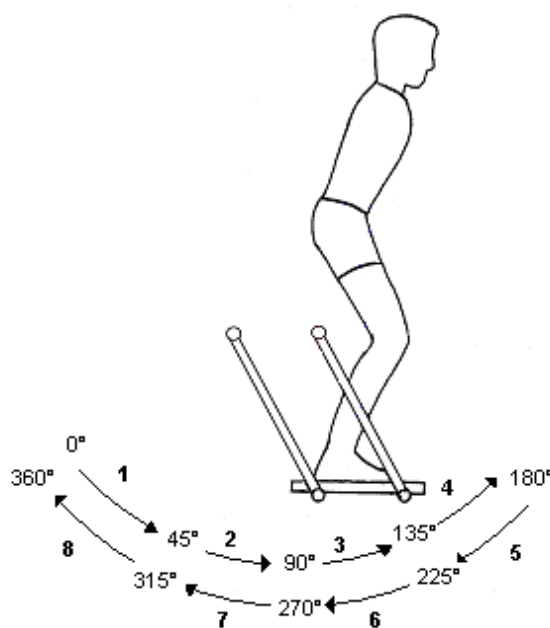
Premièrement, la série temporelle de l'angle  $\beta$  défini par l'axe marqueur 11/marqueur 12 et l'axe vertical a été calculée. Cet angle représente l'amplitude instantanée de déviation de la plateforme par rapport à sa position de repos. Cette série temporelle a été utilisée pour obtenir une moyenne de  $\beta$  pour chaque essai au niveau de son amplitude, de sa fréquence et de sa fluidité, définies de la même façon que lors des études précédentes.

### 2.4.2 Phase Relative

Les coordonnées du centre de gravité global ont été calculées par la méthode de Winter (1990, Table 3.1., pp. 56-57), permettant ensuite de calculer la distance instantanée ( $D$ ) entre le barycentre des marqueurs 9 et 10 (pieds droit et gauche) et le centre de gravité.

La phase relative entre  $\beta$  et  $D$  a été calculée par la méthode de l'estimation ponctuelle, correspondant à la valeur de la phase de  $\beta$  observée lorsque  $D$  est à son minimum. En d'autres termes, la phase de l'angle  $\beta$  est mesurée lors de l'initiation du forçage de la plateforme au cours de chaque cycle.

Ainsi, pour chaque cycle, une mesure de la phase relative est obtenue (ou deux mesures dans le cas d'un double forçage). Dans le but d'augmenter la lisibilité des résultats, les phases relatives observées (RP) ont été catégorisées comme montré dans la figure 34. Sur la base de l'analyse mécanique de la tâche, les forçages efficaces devraient correspondre aux catégories RP1 et RP2 pour le balancer avant, et RP5 et RP6 pour le balancer arrière.



**Figure 34** : catégorisation des phases relatives. Le cycle est divisé en 8 segments : RP 1 [0°-45°] ; RP 2 [45°-90°] ; RP 3 [90°-135°] ; RP 4 [135°-180°] ; RP 5 [180°-225°] ; RP 6 [225°-270°] ; RP 7 [270°-315°] ; RP 8 [315°-360°].

La première analyse a consisté à calculer le pourcentage relatif de chaque catégorie, pour chaque participant, à l'intérieur de chaque session. Dans un deuxième temps, les associations des modes de coordination entre les cycles consécutifs ont été analysées. Le but de cette seconde analyse était de tester la consistance du comportement sur des cycles successifs, et d'en apprécier l'évolution au cours de la pratique.

## 2.5 Analyse statistique

Pour les variables d'amplitude, de fréquence et de fluidité de l'angle  $\beta$ , des ANOVA à un facteur (Session), avec 5 niveaux de mesures répétées ont été effectuées. Les hypothèses de normalité et d'homogénéité des variances ont été testées avant traitement. Un seuil de signification de 0.05 a été 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, un test post-hoc de Scheffé a été réalisé afin de localiser les différences significatives.

### 3. Résultats

#### 3.1 Variables quantitatives

Pour tous les participants, une augmentation de l'amplitude est constatée, de  $28,53^\circ$  ( $\pm 14^\circ$ ) lors de la première session à  $56,40^\circ$  ( $\pm 15^\circ$ ) lors de la cinquième session en moyenne. Un effet du facteur session est obtenu ( $F_{4,20}=25.14$   $p<.05$ ). Le test de Scheffé indique une différence significative entre la session 1 et toutes les autres sessions, et entre la session 2 et les sessions 4 et 5 (Figure 35, graphique du haut).

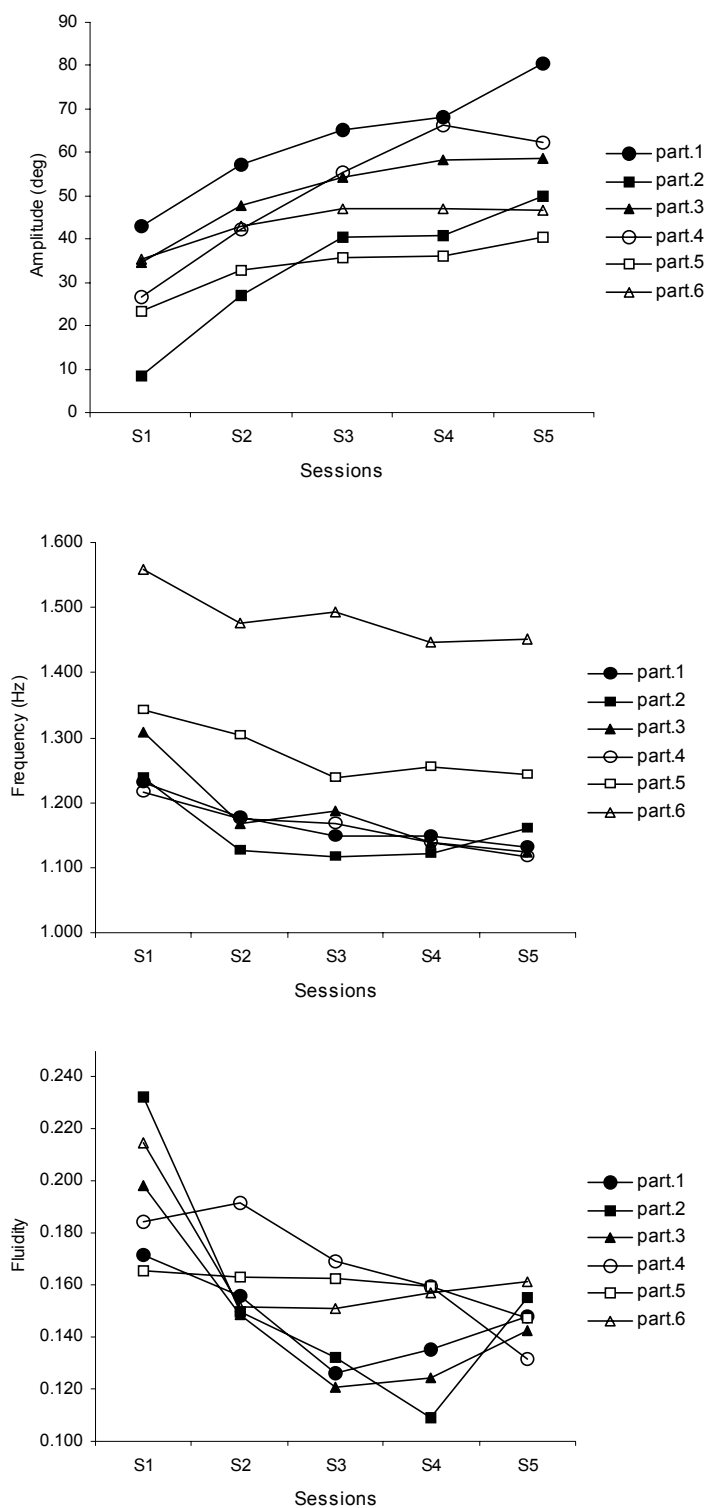
Un effet significatif du facteur session a aussi été obtenu pour la fréquence ( $F_{4,20}=23.45$ ;  $p<.05$ ), révélant une diminution de la fréquence d'oscillation de  $1.31$  Hz ( $\pm 0.13$ Hz) pour la première session à  $1.20$  Hz ( $\pm 0.13$ Hz) pour la cinquième session. Le test de Scheffé indique une différence significative entre la session 1 et toutes les autres sessions (Figure 35, graphique du milieu).

Enfin, un effet du facteur session est obtenu pour la fluidité ( $F_{4,20} = 7.88$ ;  $p<.01$ ), montrant une diminution significative de l'index de fluidité de  $0.19$  ( $\pm 0.03$ ) pour la première session à  $0.15$  ( $\pm 0.01$ ) pour la dernière session. Le test de Scheffé indique une différence significative entre la session 1 et les sessions 3, 4 et 5 (Figure 35, graphique du bas).

#### 3.2 Evolution des modes de coordination

##### 3.2.1 Evolution des stratégies de forçage

La Figure 36 reporte les pourcentages représentés par les différentes catégories de forçage précédemment définies, pour chaque participant et pour chaque session. Cette figure illustre le fait que chaque participant adopte des stratégies spécifiques tout au long de l'expérience. Le participant 1 utilise durant la 1<sup>ère</sup> session un forçage situé à la fin du balancer arrière (RP8). Cette stratégie semble être la plus fréquente durant la plupart des sessions, en association avec le double forçage, qui apparaît dans 30% des cycles durant la dernière session. Ce double forçage est généralement composé d'un premier forçage situé autour de  $180^\circ$  et d'un second forçage situé autour de  $360^\circ$ , durant le même cycle.

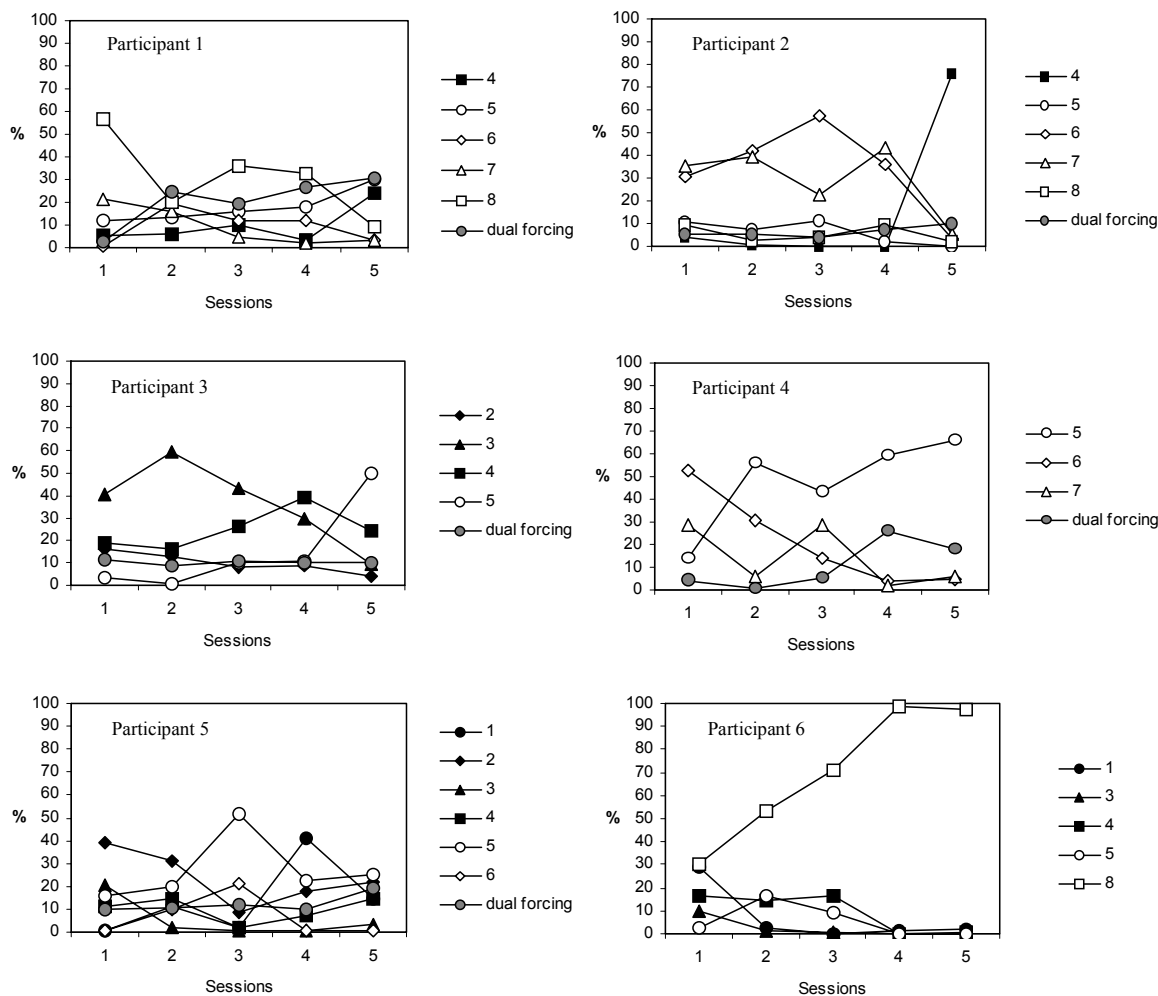


**Figure 35** : Evolution individuelle de l'amplitude (en haut), de la fréquence (au milieu), et de la fluidité (en bas), de l'angle  $\beta$  au cours des sessions.

Le participant 2 lui, forçait massivement aux alentours de la moitié du balancer arrière (RP 6 et 7), durant les 4 premières sessions. Puis de façon abrupte, il a adopté durant la dernière session un forçage situé dans la partie finale du balancer avant (RP4). Le participant 3 utilisait pendant les 3 premières sessions, dans 50% des cycles, un forçage situé juste après le milieu du balancer avant (RP3). A partir de la session 3 et jusqu'à la fin, un nouveau forçage apparaît autour du point de revirement avant (RP4), exploité de façon prédominante. Le participant 4 a commencé avec un forçage situé vers le milieu du balancer arrière (RP6). Cette première stratégie a été remplacée dès la deuxième session par un forçage assez consistant au début du balancer arrière (RP5). Durant les deux dernières sessions, un double forçage est exploité au niveau des deux points de revirements dans 25% des cycles. Le participant 5 présente des résultats plus difficiles à discerner. Durant les sessions 1 et 2, le forçage le plus fréquemment exploité se produit juste avant le milieu du balancer avant (RP2). Lors de la session 3, le participant semble favoriser un forçage localisé au début du balancer arrière (RP5). Enfin, lors des sessions 4 et 5, de multiples stratégies sont utilisées au cours des cycles et des essais. Finalement, le participant 6 a simplement stabilisé au cours des sessions le forçage situé dans la partie finale du balancer arrière (RP8), forçage qu'il utilise de manière exclusive dès la session 4.

### 3.2.2 Evolution des associations de forçages

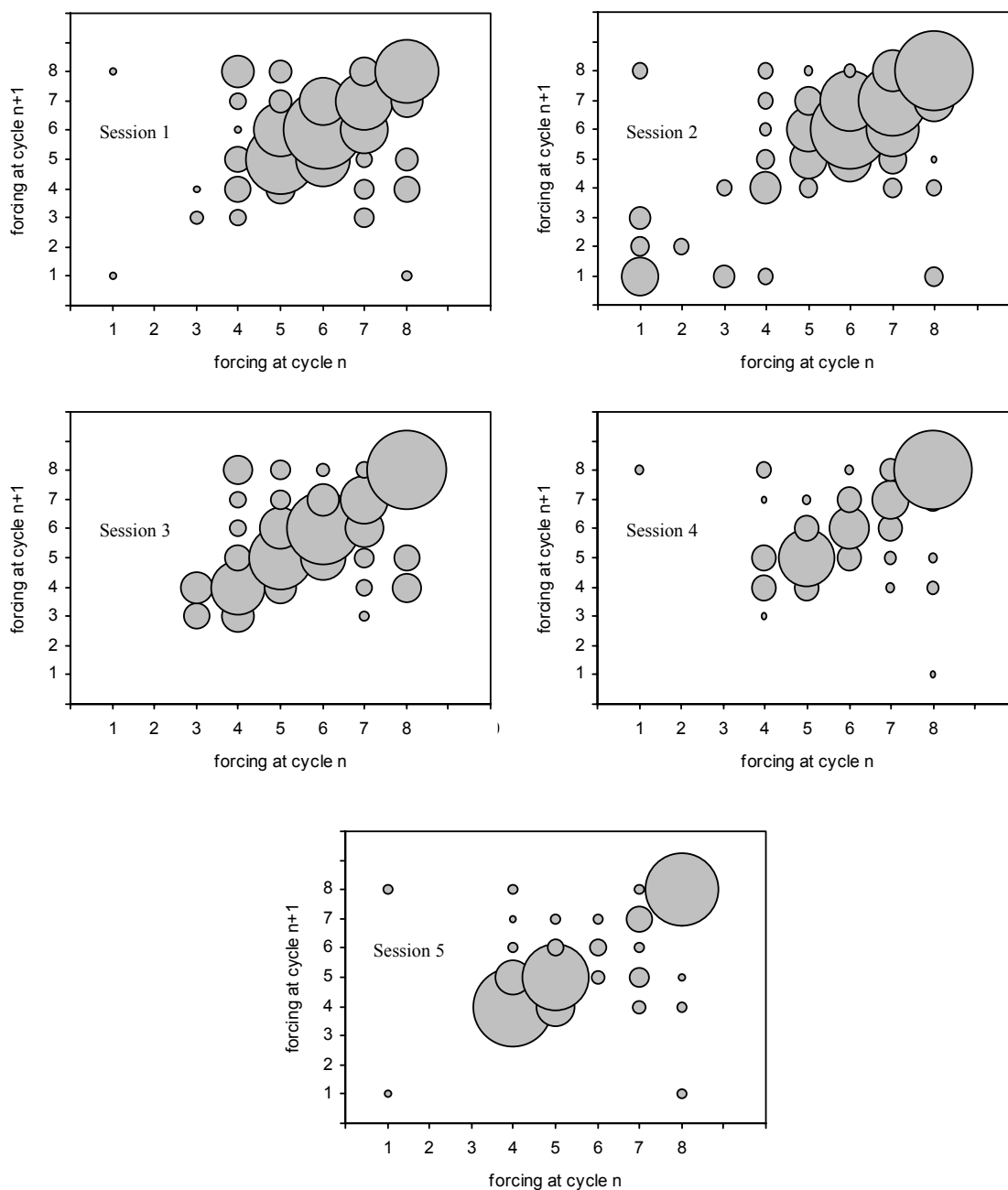
La Figure 37 propose une autre représentation des résultats, dans une perspective plus macroscopique. Elle représente les associations de modes de coordination entre des cycles successifs, et leur évolution au cours des 5 sessions. Le diamètre des cercles est proportionnel à la fréquence d'occurrence des associations correspondantes. La première observation importante est la relative consistance des coordinations au cours des cycles, indiquée par la présence de larges cercles le long de la diagonale du graphique. En d'autres termes, une coordination donnée est préférentiellement suivie par une coordination similaire durant le cycle suivant. Cependant, un certain nombre d'associations non homogènes est présent durant les premières sessions, qui tend à disparaître vers la 4<sup>ème</sup> session.



**Figure 36** : Evolution individuelle de la phase relative au cours des sessions. Chaque point représente le pourcentage de cycles caractérisé par la catégorie de phase relative correspondante. Les pourcentages inférieurs à 10% ont été omis.

Cette figure confirme aussi le fait que les forçages sont généralement situés lors du balancer arrière. Pendant la première session, le forçage semble intervenir n'importe où dans le balancer arrière, et particulièrement dans sa première moitié (RP5 et 6). Les participants abandonnent progressivement ce secteur, et favorisent les parties initiales et finales du balancer arrière. La dernière session se caractérise par une utilisation quasi-exclusive du forçage au point de revirement arrière.

Il faut noter que le double forçage a été exclu de cette analyse graphique. Généralement, les doubles forçages apparaissent lors de cycles isolés, ou sont quelquefois suivis par un second double forçage, mais ne constituent jamais une stratégie soutenue ou continue. Le double forçage semble donc être très localisé et généralement suivi par plusieurs cycles en simple forçage.



**Figure 37** : Evolution des associations des phases relatives entre deux cycles consécutifs, au cours des 5 sessions de pratique. L'axe des x correspond à la phase relative adoptée lors du cycle n, et l'axe y la phase relative celle adoptée lors du cycle n+1. Le diamètre des cercles correspond à la fréquence d'occurrence de l'association correspondante. Les données sont regroupées pour tous les participants, et les associations incluant les doubles forçages sont omises, ce qui explique que l'aire couverte par les cercles soit plus petite lors des sessions 4 et 5.

#### 4. Discussion

Tous les participants ont augmenté l'amplitude de leurs oscillations pendant l'expérience. A l'inverse, une diminution générale de la fréquence est observée. Malgré ces tendances globales, il faut noter que le rapport entre amplitude et fréquence a été géré différemment entre les participants : deux d'entre eux (participants 5 et 6) adoptent les plus hautes fréquences, mais des amplitudes faibles. Le participant 1, qui atteint l'amplitude la plus forte durant toute l'expérience, présente des fréquences très basses. Finalement, le participant 2 présente simultanément de faibles niveaux d'amplitude et de fréquence. Ce premier niveau d'observation suggère que les participants adoptent différentes voies pour réaliser la tâche, comme dans l'expérience de Durand et al. (1994) sur le simulateur de ski. Enfin, l'évolution de la fluidité n'était pas similaire pour tous les participants : l'index d'harmonicité décroît largement pour les participants 1 et 3, alors que l'évolution est nettement plus modérée pour les participants 4 et 5.

Le résultat le plus important de cette expérience est la diversité des comportements observés et de leurs évolutions en fonction des participants. Chaque participant exploitait plusieurs stratégies de forçages durant chaque session, ces stratégies étaient différentes selon les participants, et évoluaient différemment avec la pratique. Par exemple, les participants 2 et 4 adoptaient le même mode de coordination pendant la première session (RP 6 et 7), mais ces patrons ont divergé au cours de l'apprentissage. Cette divergence peut s'expliquer par les différentes stratégies utilisées pour explorer l'espace de travail perceptivo-moteur, comme le décrivent Newell et al. (1989).

Ces résultats montrent donc que la similarité des modes de coordination chez les débutants, bien que confirmée par les expériences présentées en introduction, ne peut être considérée comme une règle générale de l'apprentissage moteur. Synthétiquement, certaines tâches semblent sévèrement canaliser le comportement de l'apprenant, les conduisant à l'adoption, dès les premiers essais, d'une solution imposée, comme dans l'expérience de Delignières et al. (1998). Dans notre expérience, au contraire, les participants semblent capables d'opter pour différentes sortes de solutions, et de modifier leur comportement assez fréquemment pendant la pratique.

D'un autre côté, quelques participants exploitant différentes stratégies durant les premières sessions, tendent à adopter des modes de coordination similaires à la fin de l'expérimentation : en effet, les participants 3, 4 et 5 adoptent des comportements identiques durant la dernière session alors que leurs coordinations étaient extrêmement

différentes pendant la première session. De plus, cette dernière coordination (RP 5) correspond à une utilisation efficiente du système, avec un forçage situé juste après le point de revirement arrière. Cela suppose que les participants ont exploré l'espace de travail pendant les premières sessions avant de trouver la solution efficiente et de la stabiliser.

Cette hypothèse est renforcée par la seconde partie de nos résultats qui suggère qu'au-delà de la diversité des forçages observés pendant la pratique, la dynamique de l'occurrence des forçages n'était pas erratique. Les participants tendaient à exploiter des stratégies de forçages similaires sur des cycles successifs. Cette tendance était déjà présente pendant la première session, mais elle est devenue plus évidente avec la pratique, spécialement lors de la session 4.

De plus, la figure 37 présente une progressive concentration des moments de forçages, au cours de la pratique, sur le balancer arrière, avec notamment lors de la dernière session, une concentration sur le point de revirement arrière. Cette évolution pourrait refléter une sorte d'effet de canalisation amenant les participants à exploiter préférentiellement certaines zones du balancer.

Ces résultats sont en général en adéquation avec les conceptions développées par Newell et al. (1989) à propos de l'apprentissage moteur. Ils suggèrent que durant une première période, nos participants essaient d'explorer activement l'espace de travail dans le but de localiser les possibles solutions efficientes. Cette exploration active est particulièrement visible lors de la session 2 (voir Figure 37), durant laquelle une grande variété de stratégies de forçage est utilisée. Il faut noter que cette exploration n'apparaît pas aussi clairement lors de la première session, comme si celle-ci correspondait à une période de familiarisation nécessaire avant d'engager un processus d'exploration. A partir de la troisième session, les participants sont clairement attirés vers une stratégie de forçage située lors du balancer arrière, et tentent progressivement de stabiliser le forçage autour des points de revirement du balancer arrière.

Etrangement, le forçage est généralement initié avant les points de revirement (RP 4 et 8) plutôt qu'après, comme c'était attendu (RP 1 et 5). Ceci est particulièrement vrai pour le point de revirement arrière, pour lequel le forçage est toujours initié avant le revirement. Cette anticipation est clairement contre-productive et reste difficile à expliquer.

Finalement, les participants de cette expérience n'ont pas été capables d'exploiter systématiquement la stratégie de double forçage attendue, malgré les 5 sessions de pratiques. Le double forçage nécessite de doubler la fréquence de flexion/extension du corps, et semblent difficile à maintenir sur plus d'un ou deux cycles consécutifs. La

systematisation du forçage sur l'un des points de revirement serait susceptible de faciliter l'adoption ponctuelle d'une stratégie de double forçage, simplement par l'addition d'un second forçage autour du revirement opposé. L'évolution commune de nos participants après les 5 sessions de pratique peut alors être vue comme une première étape vers une progressive acquisition d'une coordination habile. Plus exactement, cette coordination finale ressemble à celle adoptée par les participants dans notre première expérience sur les oscillations latérales après les deux ou trois premières sessions, où tous les participants forçaient de plus en plus vers un des points de revirement, avant d'entrer dans une phase d'alternance entre simple et double forçage. Il apparaît donc que la tâche moins contraignante proposée ici, augmente la durée de la phase d'exploration par rapport à la tâche précédente, qui semble guider les participants plus rapidement vers la coordination efficiente.

### *Discussion générale*

L'objectif de ce travail était centré sur la caractérisation de la nature de la transition entre le comportement débutant et le comportement expert, lors d'une situation d'apprentissage dite compétitive. Cette identification avait pour intérêt d'observer et de comprendre la nature du lien entre ces deux coordinations, nécessaire pour donner un sens aux différentes conditions d'apprentissage. Pour cela, une analyse dynamique cycle-à-cycle des coordinations motrices a été menée tout au long de l'apprentissage de tâches imposant divers niveaux de contraintes, afin de tester les frontières du phénomène observé. Nous discuterons des apports, des confirmations et des remises en questions que soulève ce travail, vis-à-vis des différentes coordinations adoptées, de la nature de leur évolution, de la durée et de la forme que le processus peut adopter en fonction des contraintes imposées.

En premier lieu, le choix avait été fait dans ce travail de se focaliser sur des tâches mettant en jeu l'ensemble du corps, dans lesquelles les facteurs biomécaniques affectent fortement la dynamique de la coordination inter-segmentaire (Schöner, 1995), et dans lesquelles les forces inertielles ne servent pas seulement à performer (comme dans les tâches bimanuelles) mais à maintenir l'équilibre dans le champ gravitationnel. Le deuxième aspect important était de proposer des tâches dont le but ne spécifiait pas directement le patron à réaliser, laissant l'apprentissage se dérouler de façon exploratoire, afin de ne pas interférer avec le processus. Les participants devaient donc découvrir le fonctionnement de l'appareil et les coordinations possibles par eux-mêmes. Les changements pertinents dus à la pratique se situaient donc dans l'interaction entre le participant et l'appareil. Cette interaction diffère avec les travaux sur les coordinations bimanuelles par exemple, qui entrent pourtant aussi dans ce cadre d'analyse sujet-environnement. Dans ces expériences (Kelso et al., 1990; Lee, Swinnen, & Verschueren, 1995; Swinnen et al., 1997; Zanone & Kelso, 1992, 1997), les sujets devaient suivre un métronome auditif ou visuel, totalement indépendant de l'action du sujet, impliquant le fait que seul le sujet pouvait provoquer un changement de fréquence ou de phase relative. Or que ce soit sur le simulateur de ski, la balançoire ou les barres parallèles, l'appareil influence aussi le sujet. Cette influence réciproque montre la richesse dynamique non-linéaire de ces tâches qui se manifeste par l'interaction entre les oscillations de la plateforme (ou de la nacelle) et celles du centre de gravité des sujets. Le choix pris de se situer sur le niveau d'analyse sujet-appareil est donc primordial ici, puisqu'il permet d'obtenir la coordination résultante de cette interaction entre les mouvements réalisés par

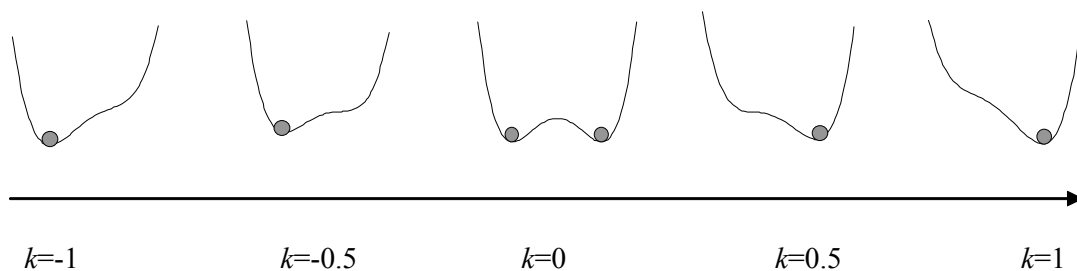
les sujets et les principes dynamiques de la tâche. Or c'est cette dynamique qui est la source majeure des contraintes sur l'action, et leur inclusion rend possible la caractérisation des changements des structures coordinatives assemblées au cours de l'apprentissage. Ainsi, les méthodes de l'approche des systèmes dynamiques ont permis d'identifier, à l'aide de la phase relative (centre de gravité/oscillation de l'appareil) comme variable collective, non seulement la nature de la structure coordinative mais aussi les changements de celle-ci au cours de la pratique.

## 5. L'apprentissage à travers une bifurcation *saddle-node*

### 5.1 caractéristiques essentielles (les invariants)

Dans les quatre études présentées dans ce travail, une certaine invariance a été mise en évidence dans la forme de l'évolution du comportement, consistante avec les prédictions de Kelso et Jeka (1992). Ces auteurs ont émis en effet l'hypothèse que des tâches requérant une coordination entre différents composants, ou entre composants ayant des fréquences intrinsèques différentes étaient susceptibles de rompre la symétrie de la dynamique de coordination, et donc d'adopter des bifurcations de type *saddle-node* et non en fourche.

La Figure 38 représente l'évolution des attracteurs au cours de la bifurcation *saddle-node*. Tous nos résultats présentent une dynamique de ce type, soit de façon totale (expérience 2 du chapitre 2 et certains participants de la première expérience de ce même chapitre), soit de façon partielle (étude 1 et 4) mais laissant penser qu'un tel processus est en cours. Ainsi le premier comportement stabilisé par les débutants correspond au premier schéma caractérisant un seul attracteur lorsque la valeur du paramètre de contrôle est de -1.



**Figure 38** : Evolution de la fonction de potentiel  $[V(x)=ax^4+bx^2+kx]$  durant une bifurcation *saddle-node*. La flèche indique l'évolution du paramètre de contrôle  $k$  (de -1 à 1).

Par la suite, à chaque fois, une dérive de ce comportement en direction de la bifurcation qu'illustre la fonction potentiel quand  $k=-0.5$ , a été observée, accompagnée d'une perte de stabilité de ce comportement initial. Cette dérive ou *phase slippage* entraîne la coordination dans une phase d'*intermittence*, lors de laquelle le sujet exploite en alternance la coordination débutante et la coordination experte, souvent d'un cycle à l'autre. Ce type de comportement est représenté par le 3<sup>ème</sup> schéma de la figure 38, lorsque le paramètre de contrôle est égal à 0. Ensuite, les sujets se stabilisent sur la coordination experte qui devient le seul attracteur du système, comme représenté par le dernier graphique. Il semble donc que ce type de transition, déjà utilisé pour caractériser la transition marche/course (Dietrich & Warren, 1995), permette aussi de rendre compte du processus d'apprentissage. La différence entre ces deux phénomènes réside dans la plus ou moins grande linéarité de l'évolution du paramètre de contrôle (Nourrit et al., 2003). Lors de la transition marche/course, le paramètre de contrôle correspond à la vitesse du mouvement qui est modifiée expérimentalement de façon linéaire, et qui fait basculer le système d'un état stable (la marche) vers un autre état stable (la course) (Dietrich & Warren, 1995). Le système bascule tout de suite dans l'attracteur « course » sans observer de phase d'*intermittence*. A contrario, nous observons dans nos études cette phase d'*intermittence*, suggérant que le paramètre de contrôle n'évolue pas de façon linéaire et tend à stagner à l'approche de la transition. L'hypothèse émise par Thelen (1986)(Thelen, 1986), qui voit dans le paramètre de contrôle de la locomotion non pas la vitesse de déplacement mais la gestion de l'équilibre pourrait donner une explication viable à la différence de linéarité de ce paramètre lors de l'apprentissage et lors de la transition marche/course. En effet, la transition marche/course se fait entre deux patrons initialement présents dans le répertoire du sujet, et donc stables. La déstabilisation de l'un entraîne le système directement vers un deuxième attracteur accessible. A l'inverse, lors de l'apprentissage, si le premier comportement a une certaine stabilité, le deuxième est inexistant au début de la pratique. Le sujet va donc chercher à produire un comportement mieux adapté à la tâche, tout en gérant cette problématique d'équilibre. Les résultats de notre expérimentation sur le simulateur de ski en comparaison de ceux obtenus par Nourrit et al. (2003) sur le simulateur de mono-ski montrent clairement que la durée de la phase de transition est diminuée lorsque la gestion de l'équilibre est plus simple à réaliser. La fréquence ou vitesse de mouvement ainsi que la pratique ne seraient donc pas les seuls paramètres de contrôle à pouvoir influencer sur l'évolution du comportement moteur. Cependant, notre travail ne permet pas de conclure réellement sur ce sujet, mais pose plutôt

la question de la multiplicité et d'une possible hiérarchisation des paramètres de contrôle entrant en jeu dans l'évolution des coordinations en fonction des caractéristiques de la tâche et de l'organisme.

## 5.2 Variations de la transition

### 5.2.1 Au niveau des échelles de temps

Ainsi, il semble que les contraintes imposées par la tâche, notamment au niveau de la gestion de l'équilibre, font que la période de bistabilité (ou *intermittence*) perdure sur un certain nombre de cycles. La gestion d'un équilibre totalement inhabituel lors des balancers en position mi-renversée aux barres parallèles pourrait être à l'origine de cette longue phase d'*intermittence* observée. A l'inverse l'expérience sur le simulateur de ski permet de gérer l'équilibre assez facilement, entraînant ainsi un raccourcissement de la période de bi-stabilité. Enfin, il est possible d'émettre l'hypothèse que les résultats obtenus sur les coordinations bimanuelles ne sont que le reflet d'une transition *saddle-node* dans laquelle la période d'*intermittence* n'apparaîtrait pas, de par l'absence de contraintes d'équilibre et de par la spécification du patron à adopter, qui guide fortement le sujet au cours de l'apprentissage.

De la même manière il est possible de penser que la durée de la phase de bi-stabilité va dépendre de la résistance des coordinations spontanées. En effet, sur notre première étude sur la balançoire où les coordinations évoluent très vite, la phase de transition est assez rapide alors que sur le simulateur de ski modifié, elle peut durer sur une cinquantaine d'essais. Sur les versions basiques du simulateur, Vereijken (1991) et Nourrit (2000) montrent que les changements s'opèrent dès les premières sessions.

### 5.2.2 Du niveau d'observation

De plus, ce travail permet de montrer que ce type de transition est observé à différents niveaux d'observation. En effet, les travaux de Nourrit et al. (2003) qui ont servi de base à ce travail portaient sur l'étude du mouvement résultant, que nous avons choisi de réétudier lors du premier chapitre expérimental. Il semble que quel que soit le niveau

d'observation, la bifurcation de type *saddle-node* soit retrouvée, avec les mêmes variations de temps. En effet, dans les chapitres suivants, le niveau d'analyse s'est porté sur la coordination entre les oscillations du centre de gravité et des balancers, permettant de mettre en évidence une transition *saddle-node*, d'échelle de temps variable, comme sur le simulateur de ski (en comparaison par exemple l'expérience de Nourrit et al. De 2003 et la nôtre).

Pour autant, dans ce travail, la coordination inter-segmentaire et son évolution, traduits en terme de gel et dégel des degrés de liberté (Bernstein, 1967) n'ont pas été testés. Récemment, de nombreuses études ont été réalisées sur cette thématique afin de comprendre ce processus de libération des degrés de liberté (Berthouze & Lungarella, 2004; Chen, Liu, Mayer-Kress, & Newell, 2005; Haken, 1996; Hong & Newell, 2005; Ko, Challis, & Newell, 2003; Lungarella & Berthouze, 2002). S'il semble que l'évolution des coordinations inter-segmentaires se fasse par des changements qualitatifs de patrons, il apparaît que le processus de gestion de ces degrés de liberté soit plus complexe que ne le pensait Bernstein. (Hong & Newell, 2005). Néanmoins, aucune expérience n'a encore exploré sur des tâches complexes l'évolution permanente de ces degrés de liberté. Il faut alors se demander si la bifurcation de type *saddle-node* pourrait caractériser ce changement et ainsi expliquer la diminution de la dimensionnalité du mouvement quand les sujets accèdent à une coordination plus optimale.

L'intérêt d'une telle transition est qu'elle semble pouvoir répondre à diverses situations d'apprentissage, que celles-ci soient dépendantes des contraintes de la tâche ou des contraintes organiques. De plus envisager l'apprentissage comme une bifurcation *saddle-node* dont le paramètre de contrôle pourrait évoluer de façon plus ou moins linéaire permettrait de donner une seule explication aux résultats divergents retrouvés dans la littérature, sur la discontinuité de l'apprentissage.

## **6. Nature du lien entre coordinations spontanées et coordinations expertes.**

Au vu des résultats obtenus dans ce travail, il semble que la coordination débutante puisse être considérée comme une aide à l'émergence de la coordination experte.

En effet, nos résultats suggèrent une vision tout à fait nouvelle des discontinuités marquant l'apprentissage. Il semble en fait que durant la phase d'alternance, les sujets utilisent le comportement initial comme une sorte de « tête de pont », permettant l'exploration de nouveaux comportements, offrant ainsi à tout instant une solution de repli.

Dans toutes nos expériences, durant cette période de transition, les sujets oscillent d'un cycle à l'autre entre leur coordination débutante et la coordination optimale. Cette alternance permettrait en quelque sorte une exploration sécurisée du comportement expert, le sujet pouvant à tout moment revenir au comportement initial qu'il maîtrise et qui est plus stable.

Par ailleurs, la première période de l'apprentissage, au cours de laquelle le comportement initial est exploité de manière exclusive, est marquée par une évolution paramétrique de la coordination, qui semble destinée à en permettre l'utilisation en alternance avec le comportement expert. En effet, d'après Kelso et Jeka (1992), cette dérive est nécessaire pour entrer en phase d'*intermittence*. Il apparaît alors fondamental de laisser les coordinations spontanées émerger et dériver pour permettre à tout apprenant de s'installer dans cette phase d'alternance et de créer ainsi une coordination experte stable. De manière assez paradoxale, il semble donc exister 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).

## **7. Influence des contraintes sur les coordinations spontanées**

### 7.1 Homogénéité des coordinations spontanées

A propos de l'adoption des coordinations spontanées, ce travail remet en cause la notion d'homogénéité des coordinations du débutant, souvent apposée comme une loi générale de l'apprentissage moteur, que cela soit sur des tâches de coordination bimanuelle (Zanone & Kelso, 1992, 1997), ou sur des tâches mettant en jeu de multiples segments corporels (Delignières et al., 1998 ; Kelso et Zanone, 2002 ; Nourrit et al., 2003 ; Temprado et al., 1997). Toutes ces expériences ont confirmé l'existence du principe fondamental de tout système auto-organisé qu'est la synchronisation des phases et des fréquences (Kelso, 1995), qui permettrait au système nerveux central d'organiser le mouvement de façon simple, en exploitant uniquement les points de revirements. En d'autres termes, les coordinations spontanées peuvent être analysées comme les coordinations les plus simples possibles, c'est-à-dire les plus économiques en termes de contrôle, même si elles ne sont pas efficaces par rapport à la tâche.

Les résultats obtenus au cours de ce travail incitent néanmoins à relativiser ce principe. En effet, notre dernière étude sur les balancers dans le plan antéro-postérieur montre une grande variabilité qualitative du comportement des débutants, tant au niveau inter-individuel qu'au niveau intra-individuel, La coordination pouvant 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. La comparaison des comportements novices entre nos deux études sur la balançoire exprime le fait que la classification tâche simple/tâche complexe n'est pas suffisante pour prévoir le type de comportement adopté. Il semble que les contraintes inhérentes à la tâche jouent un rôle clef dans la possible apparition d'un comportement typique ou variable. Plus exactement, il est probable que les tâches imposant une forte contrainte de maintien de l'équilibre limitent grandement les possibilités d'action. Ainsi, l'expérience de Delignières et al. (1998) aux barres parallèles était en ce sens extrêmement contraignante : les sujets devaient en premier lieu gérer leur équilibre dans la position mi-renversée, et ce n'est qu'une fois ce problème résolu qu'ils pouvaient s'engager dans le but de la tâche (i.e. entretenir puis amplifier les balancers). Ici, les débutants ont tous adopté une coordination en phase, qui n'a pas évolué pendant 80 essais. En comparaison, notre expérience permettait de diminuer cette contrainte d'équilibre, puisque les sujets s'installaient dans la nacelle. Nos résultats indiquent que les sujets, même s'ils adoptent tous la même coordination au départ, peuvent explorer l'espace de travail plus rapidement (variabilité de cette coordination), afin de satisfaire le but de la tâche, ce qui amène un changement beaucoup plus rapide des coordinations et plus de variabilité inter et intra-individuelle. La même lecture est possible sur la comparaison entre les résultats homogènes obtenus par Nourrit et al. (2003) sur le simulateur de ski modifié en mono-ski et les résultats de Vereijken (1991) ou Durand et al. (1994) montrant une grande différence inter et intra sujets lors des premiers essais.

L'idée d'une forte convergence des comportements adoptés par les débutants semble donc devoir être relativisée en fonction des contraintes imposées par 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 pouvoir explorer plus librement l'espace de travail à la recherche des solutions pertinentes (Newell, Kugler, van Emmerik & McDonald, 1989). En ce sens, l'idée d'une homogénéité du comportement débutant ne refléterait qu'un cas

particulier de l'apprentissage renvoyant à la pratique d'une tâche relativement contraignante.

## 7.2 Optimalité des contraintes de la tâche

De plus, lorsque le système est très fortement contraint, comme dans l'expérience de Delignières et al. (1998), les sujets ont du mal à se sortir de ce premier mode de coordination imposé, et peinent à explorer l'espace de travail. L'apprentissage est alors extrêmement long. Inversement, quand les contraintes sont faibles comme dans notre dernière expérience sur la balançoire, les sujets restent très longtemps dans la phase d'exploration de l'espace de travail avant de se fixer sur la région contenant la solution motrice efficiente. Entre ces deux niveaux de contraintes, il semble que le processus d'apprentissage se déroule plus vite. Que ce soit lors de notre expérience sur simulateur de ski (ou celles de Vereijken), ou lors de notre première expérience sur la balançoire, les sujets explorent l'espace de travail lors des tous premiers essais, et entrent ensuite très rapidement dans la phase d'alternance permettant d'accéder au comportement expert. Ces comparaisons amènent à se poser deux questions fondamentales. Premièrement, existe-t-il un niveau de contrainte optimal qui permettrait de guider au mieux le sujet dans l'espace de travail ? Et si tel était le cas, cela signifierait-il que la tâche la plus difficile n'est pas nécessaire la plus contraignante, et vice versa ? La réponse à ces deux questions pourrait se trouver dans la construction d'un paradigme expérimental permettant une large variation des contraintes de la tâche afin d'explorer un maximum de niveaux de canalisation possibles et d'en analyser les effets sur les comportements adoptés. Cette tâche devra posséder les mêmes principes de discontinuité entre mouvement spontané et mouvement expert que ceux de la balançoire ou des barres parallèles, ainsi que des contraintes identifiables voire quantifiables afin d'obtenir un maximum d'informations sur le rôle des contraintes dans l'adoption de coordination(s) spontanée(s) et dans la transition.

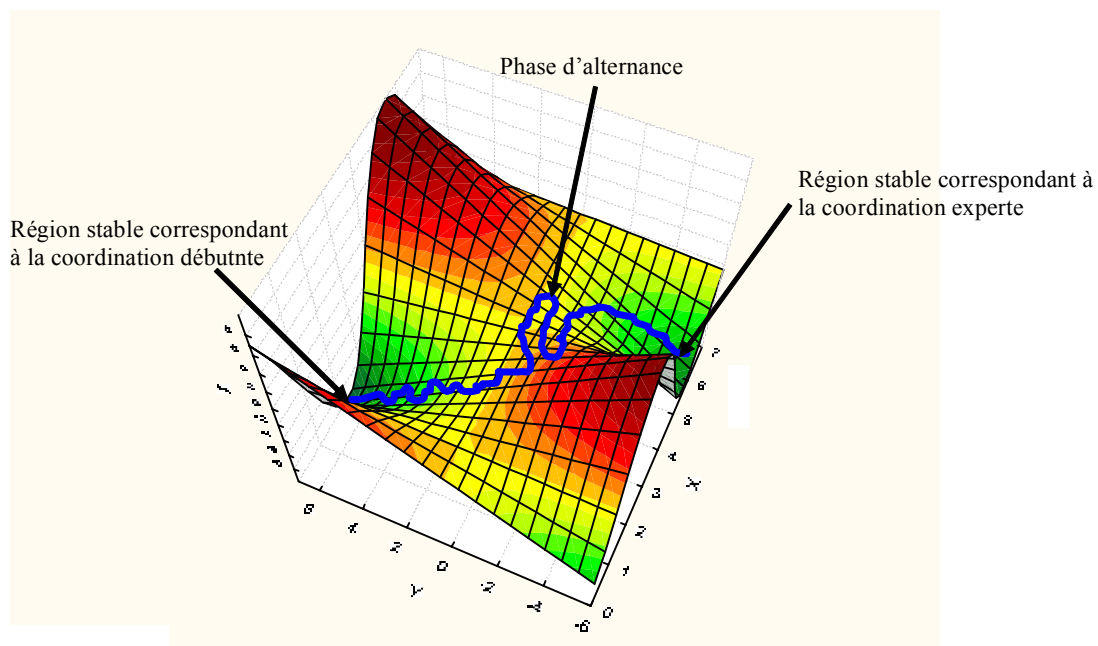
## 8. Conclusion

L'apprentissage moteur peut donc être compris en terme de changements dans les concepts « dynamiques » comme les degrés de liberté, les contraintes de l'action, les structures coordinatives, les variables collectives et l'espace de travail. L'approche des systèmes dynamiques offre en effet une méthodologie générale adéquate pour mener des investigations sur l'acquisition d'habiletés impliquant de multiples degrés de liberté

biomécaniques. Cela a permis au cours de ce travail de caractériser l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'habiletés globales nécessitant une réorganisation qualitative du comportement, à l'aide d'une analyse cycle-à-cycle de la variable collective (i.e : phase relative).

En premier lieu, ce travail montre l'intérêt fondamental du comportement du débutant dès lors que l'on s'intéresse à l'apprentissage moteur. Les coordinations spontanées sont la base de l'acquisition motrice. Plus exactement, c'est l'adoption d'un premier mode de coordination stable qui va permettre au débutant d'évoluer efficacement dans l'espace de travail. Cette première adoption peut passer tout d'abord par une phase d'exploration de l'espace de travail si la tâche ne contraint pas suffisamment le comportement.

La Figure 38 représente un espace de travail quelconque pour une tâche relativement contraignante, dans laquelle la coordination spontanée se situe directement dans une région stable.



**Figure 38** : Représentation de la route de l'apprentissage (en bleu) à l'intérieur de l'espace de travail perceptivo-moteur.

Une fois cette première coordination stabilisée, celle-ci va dériver en direction de la bifurcation (le « col » sur la figure) : cette dérive dans l'espace de travail est donc nécessaire à l'apparition de la bifurcation et démontre encore une fois l'importance qu'il faut accorder à cette première coordination. S'ensuit une phase d'alternance lors de

laquelle les deux coordinations expertes et débutantes sont adoptées l'une après l'autre, mais ont pour caractéristique commune une faible stabilité. Par la suite, le sujet stabilise son comportement dans la région optimale de l'espace de travail, correspondant à l'adoption d'une coordination experte efficace (voir notre première étude sur le simulateur).

De plus, la durée de ce processus peut varier en fonction des contraintes imposées par la tâche et par l'organisme. Par exemple, la diminution des contraintes obtenue avec la nacelle dans l'expérience sur les barres parallèles, en comparaison avec les résultats de Delignières et al. (1998) laisse penser que la guidance physique pourrait permettre de créer des situations d'apprentissage dans lesquelles les contraintes de la tâche seraient optimales, c'est-à-dire qu'elles canaliserait suffisamment le comportement pour limiter la durée de la phase d'exploration, sans pour autant geler le système et l'empêcher d'évoluer comme c'est le cas dans l'expérience de Delignières et al. (1998). Cette hypothèse rejoindrait celle émise par Vereijken (1991) qui pensait qu'une aide bénéfique à l'apprentissage était celle qui permettait de diminuer le problème du contrôle du mouvement sans pour autant diminuer le nombre de degrés de liberté mis en jeu dans le mouvement, ce qui permet aux sujets de les explorer. Une situation inverse pourrait freiner le processus d'apprentissage. L'hypothèse peut être émise qu'une situation diminuant trop fortement ce problème de contrôle interviendrait comme un frein à l'apprentissage.

Ce travail propose donc une nouvelle perspective pour les professionnels du sport, de l'E.P.S., ou de la rééducation qui pourraient envisager l'évolution des participants en fonction des premières coordinations adoptées, et non en fonction de ce vers quoi il faut tendre. Cependant, ces hypothèses de coopération et d'évolution de la coordination débutante en fonction des contraintes doivent être mises à l'épreuve sur des tâches imposant des systèmes de contraintes différents pour attester de leur pertinence et déboucher sur une théorie plus complète de l'acquisition des habiletés motrices complexes.

- Abernethy, B. (1987). Selective attention in fast ball sport:II. Expert-novice differences. *Australian Journal of Science and Medecine in Sport*, 19, 7-16.
- Abernethy, B. (1993). *The nature of expertise in sport*. Paper presented at the 8th World Congress of Sport Psychology, Lisbonne.
- Abernethy, B., & Russell, D. G. (1987). Expert-novice differences in a applied selective attention task. *Journal of Sport Psychology*, 9, 326-345.
- Abraham, R. H., & Shaw, C. D. (1982). *Dynamics: The geometry of behavior: Part I. Periodic behavior*. Santa Cruz, CA: Aerial Press.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.
- Arutyunyan, G. H., Gurfinkel, V. S., & Mirskii, M. L. (1968). Investigation of aiming at a target. *Biophysics*, 13, 536-538.
- Arutyunyan, G. H., Gurfinkel, V. S., & Mirskii, M. L. (1969). Organization of movements on execution by man of an exact posture task. *Biophysics*, 14, 1162-1167.
- Bardy, B., Marin, L., Stoffregen, T., & Bootsma, R. J. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1284-1301.
- Beek, P. J. (1989). *Juggling dynamics*. Amsterdam: Free University Press.
- Beek, P. J., & Beek, W. J. (1988). Tools for constructing dynamical models of rhythmic movement. *Human Movement Science*, 7, 301-342.
- 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.
- Bergé, P., Pomeau, Y., & Dubois-Gange, M. (1997). *Des rythmes au chaos*. Paris: Opus.
- Bergé, P., Pomeau, Y., & Vidal, C. (1984). *L'ordre dans le chaos*. Paris: Hermann.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. (Oxford:Pergamon Press ed.).
- Berthouze, L., & Lungarella, M. (2004). Motor Skill Acquisition Under Environmental Perturbations: On the Necessity of Alternate Freezing and Freeing of Degrees of Freedom. *Adaptative Behavior*, 12(1), 47-64.
- Bingham, G. P. (1988). Task-specific devices and the perceptual bottleneck. *Human Movement Science*, 7, 301-342.

- Bonnet, M., Guiard, Y., Requin, J., & Semjen, A. (1994). Mécanismes généraux de la motricité. In M. Richelle & J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 587-656). Paris: PUF.
- Brisswalter, J. (1994). *Etude des processus d'adaptation à la course à pied pour des intensités submaximales: effet des interactions entre la variabilité du coût énergétique et celle des paramètres cinématiques de la foulée chez des athlètes de haut niveau de performance*. Université de Paris V, Paris.
- Buchanan, J. J., & Kelso, J. A. S. (1993). Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Exp Brain Res*, *94*, 132-142.
- Buchanan, J. J., Kelso, J. A. S., DeGuzman, G. C., & Dinga, M. (1997). The spontaneous recruitment and suppression of degrees of freedom in rhythmic hand movements. *Human Movement Science*, *16*(1), 1-32.
- Candau, R., Belli, A., Millet, G. Y., Georges, D., Barbier, B., & Rouillon, J. D. (1998). Energy cost and running mechanics during a treadmill run to voluntary exhaustion in humans. *European Journal of Applied Physiology*, *77*, 479-485.
- Carnahan, H., Van Eerd, D. L., & Allard, F. (1990). A note on the relationship between task requirements and the contextual interference effect. *Journal of Motor Behavior*, *22*, 159-169.
- Carroll, W. R., & Bandura, A. (1982). The role of visual monitoring in observational learning of action patterns: Making the unobservable observable. *Journal of Motor Behavior*, *14*, 153-167.
- Carson, R. G., Byblow, W. D., Abernethy, B., & Summers, J. J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination. *Human Movement Science*, *15*, 565-589.
- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., & Elliot, D. (1994). Intentional switching between patterns of interlimb coordination. *Journal of Human Movement Studies*, *27*, 201-218.
- Case. (1996). The pumping of a swing from the standing position. *American Journal of Physics*, *64*, 215-220.
- Catalano, J. F., & Kleiner, B. M. (1984). Distant transfer and practice variability. *Perceptual and Motor Skills*, *58*, 851-856.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive Psychology*, *4*, 55-81.

- Chen, H. H., Liu, Y. T., Mayer-Kress, G., & Newell, K. M. (2005). Learning the pedalo locomotion task. *Journal of Motor Behavior*, 37(3), 247-256.
- Corbetta, D., & Vereijken, B. (1999). Understanding development and learning of motor coordination in sport: the contribution of the dynamic systems theory. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 1-24.
- Crossman, E. R. F. W. (1959). A theory of the acquisition of speed-skill. *Ergonomics*, 2, 153-166.
- Darling, W. G., & Cooke, J. D. (1987). Changes in the variability of movement trajectories with practice. *Journal of Motor Behavior*, 19, 291-309.
- Davids, K., Handford, C., & Williams, M. (1994). The natural physical alternative to cognitive theories of motor behavior: An invitation to interdisciplinary research in sports sciences? *Journal of Sport Sciences*, 12, 495-528.
- Del Rey, P., Wulghalter, M. E., & Carnes, M. (1987). Level of expertise, interpolated activity, and contextual interference effects on memory and transfer. *Perceptual and Motor Skills*, 64, 275-284.
- Delignières, D., Geoffroi, V., Nourrit, D., & Durand, M. (1996, 28-31 Mai 1996). *Energy expenditure and efficiency in the learning of a complex cyclical skill*. Paper presented at the 1st Annual Congress of ECSS, Nice.
- Delignières, D., Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., & Caillou, N. (1999). Effects of practice and task constraints on stiffness and friction functions in biological movements. *Human Movement Science*, 18(6), 769-793.
- Delignières, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M., & Micallef, J.-P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17(2), 221-241.
- den Brinker, B. P. L. M., Stabler, J. R. L. W., Whiting, H. T. A., & van Wieringen, P. C. W. (1985). A multidimensional analysis of some persistent. In D. Goodman & R. B. Wilberg & I. M. Franks (Eds.), *Differing Perspectives in Motor Learning, Memory, and Control* (pp. 193-207). Amsterdam: North-Holland.
- Diedrich, F. J., & Warren, W. H., Jr. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 183-202.

- Durand, M., & Barna, R. (1987). Caractéristiques des tâches et performances motrices: études développementales. In A. Vom Hofe & R. Simonnet (Eds.), *Recherches en psychologie du sport*. Paris: EAP.
- Durand, M., Geoffroi, V., Varray, A., & Préfaut, C. (1994). Study of the energy correlates in the learning of a complex self-paced cyclical skill. *Human Movement Science, 13*(6), 785-799.
- Fitts, P. M. (1964). Perceptual-motor skills learning. In A. W. Melton (Ed.), *Categories of human learning* (pp. 243-285). New-York: Academic Press.
- Fowler, C. A., & Turvey, M. T. (1978). Skill acquisition: An event approach with special reference to searching for the optimum of a function of several variables. In G. E. Stelmach (Ed.), *Information Processing in Motor Control and Learning* (pp. 1-40). New-York: Academic Press.
- Fung, J., Henry, S. M., & Horak, F. B. (1995). Is the force constraint strategy used by humans to maintain stance and equilibrium? *Society of Neurosciences Abstract, 21*, 683.
- Gabriele, T. E., Hall, C. R., & Buckolz, E. E. (1987). Practice schedule effects on the acquisition and retention of a motor skill. *Human Movement Science, 6*, 1-16.
- Gelfand, I. M., & Tsetlin, M. L. (1962). Some methods of control for complex systems. *Russian Mathematical Surveys, 17*, 95-116.
- Geoffroi, V., Delignières, D., & Durand, M. (1995). *Learning strategies and energy correlates in a complex cyclical self-paced skill acquisition*. Paper presented at the Integrating laboratory and fields studies: Proceedings of the IXth European Congress on Sport Psychology., Bruxelles.
- Gibson, J. J. (1966). *The Senses Considered as Perceptual System*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gleick, J. (1989). *La théorie du chaos*. Paris: Flammarion.
- Glencross, D. J., Whiting, H. T. A., & Abernethy, B. (1994). Motor Control, Motor Learning and the acquisition of Skill: Historical Trends and Future Directions. *Journal of Sport Psychology, 25*, 32-52.
- Green, T. D., & Flowers, J. H. (1991). Implicit versus explicit learning processes in a probabilistic, continuous fine-motor catching task. *Journal of Motor Behavior, 23*, 293-300.
- Guiard, Y. (1993). On Fitts's and Hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica, 82*, 139-159.

- Haibach, P. S., Daniels, G. L., & Newell, K. M. (2004). Coordination changes in the early stages of learning to cascade juggle. *Human Movement Science, 23*, 185-206.
- Haken, H. (1983). *Synergetics: An Introduction* (3rd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Haken, H. (1984). *Advanced Synergetics* (2nd ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Haken, H. (1988). Synergetics in pattern recognition and associative action. In H.Haken (Ed.), *Neural and synergetic computers*. London: Springer-Verlag.
- Haken, H. (1996). *Principles brain functioning*. Berlin: Springer.
- Haken, H., Kelso, J. A., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics, 51*(5), 347-356.
- Haken, H., & Wunderlin, A. (1990). Le chaos déterministe. *La recherche, 21*, 1248-1255.
- Hautala, R. M., & Kidd, T. (1990). Retention of a linear task at a novel distance after practice at varied distances. *Perceptual and Motor Skills, 71*, 1355-1358.
- Henry, S. M., Fung, J., & Horak, F. B. (2001). Effect of stance width on multidirectional postural responses. *Journal of Neurophysiology, 85*(2), 559-570.
- Higgins, J. R., & Spaeth, R. K. (1972). Relationship between consistency of movement and environmental condition. *Quest, 17*, 61-69.
- Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2002). Modelling coaching practice: the role of instruction and demonstration. *Journal of Sports Science, 20*(10), 793-811.
- Hogberg, P. (1952). How do stride length and stride frequency influence the energy output during running? *Arbeitsphysiologie, 14*, 437-441.
- Holt, K. G., Hamill, J., & Andres, R. O. (1991). Predicting minimal energy costs of human walking. *Medecine and Science in Sports and Exercise, 23*, 491-498.
- Holt, K. G., Jeng, S. F., Ratcliffe, R., & Hamill, J. (1995). Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency. *Journal of Motor Behavior, 27*, 164-178.
- Hong, S. L., & Newell, K. M. (2005). Practice Effects on Local and Global Dynamics of the Ski-Simulator Task. *manuscrit soumis pour publication*.
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support surface configurations. *Journal of Neurophysiology, 55*(6), 1369-1381.
- Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature, 292*, 239-240.
- Jagacinski, R. J., Peper, C. E., & Beek, P. J. (2000). Dynamic, stochastic, and topological aspects of polyrhythmic performance. *Journal of Motor Behavior, 32*(4), 323-336.

- Jeka, J. J., & Kelso, J. A. S. (1989). The Dynamic Pattern Approach to Coordinated Behavior: A Tutorial Review. In S. A. Wallace (Ed.), *Perspectives on the Coordination of movement* (pp. 3-45). North-Holland: Elsevier.
- Jeka, J. J., Kelso, J. A. S., & Kiemel, T. (1993). Spontaneous transitions and symmetry: Pattern dynamics in human four-limb coordination. *Human Movement Science, 12*, 627-651.
- Kay, B. A. (1988). The dimensionality of movement trajectories and the degrees of freedom problem: A tutorial. *Human Movement Science, 7*, 343-364.
- Kay, B. A., Saltzman, E. L., Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Space-time behavior of single and bimanual rhythmical movements: Data and limit cycle model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 13*, 172-192.
- Kelso, J. A. S. (1981). Contrasting perspectives on order and regulation in movement. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and performance IX* (pp. 437-457). Amsterdam: North-Holland publishing Compagny.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 15*, R1000-R1004.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns. The self- organization of brain and behavior*. Cambridge, Mass: MIT Press.
- Kelso, J. A. S., Buchanan, J. J., & Wallace, S. A. (1991). Order parameters for the neural organisation of single, multijoint limb movement pattern. *Experimental Brain Research, 85*, 432-444.
- Kelso, J. A. S., deGuzman, G. C., & Holroyd, T. (1991). The self-organized phase attractive dynamics of coordination. In A. Babloyantz (Ed.), *Self-organisation, Emerging Properties, and Learning* (pp. 41-62). NY: Plenum.
- Kelso, J. A. S., Delcolle, J.-D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention et Performance XIII* (pp. 139-169). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kelso, J. A. S., Ding, M., & Schöner, G. (1993). Dynamic pattern formation: A primer. In L. B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development* (pp. 13-50). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures and dissipative structures:II. Empirical lines of

- convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 49-70). Amsterdam: North-Holland.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of Human Interlimb Coordination Emerge from the Properties of Non-Linear, Limit Cycle Oscillatory Processes: Theory and Data. *Journal of Neurophysiology*, *13*(4), 226-261.
- Kelso, J. A. S., & Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human multilimb coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, *18*, 645-668.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. F., & Schöner, G. (1988). Dynamics governs switching among patterns of coordination in biological movement. *Physics Letters A*, *134*(1), 8-12.
- Kelso, J. A. S., & Scholz, J. P. (1985). Cooperative phenomena in biological motion. In H. Haken (Ed.), *Complex systems: Operational approaches in neurobiology, physics and computers*. Berlin: Springer Verlag.
- Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Toward a physical (synergetic) theory of biological coordination. *Springer Proceedings in Physics*, *19*, 224-237.
- Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, *7*(1), 27-46.
- Kelso, J. A. S., Schöner, G., Scholz, J. P., & Haken, H. (1987). Phase-locked modes, phase transitions and component oscillators in biological motion. *Physica Scripta*, *35*, 79-87.
- Kelso, J. A. S., & Zanone, P. G. (2002). Coordination Dynamics of Learning and Transfer Across Different Effector Systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*(4), 776-779.
- Kerr, R., & Booth, B. (1978). Specific and varied practice of motor skills. *Perceptual and Motor Skills*, *46*, 27-46.
- Ko, Y. G., Challis, J. H., & Newell, K. M. (2003). Learning to coordinate redundant degrees of freedom in a dynamic balance task. *Human Movement Science*, *22*(1), 47-66.
- Kugler, P. N. (1986). Morphological perspectives on the origin and evolution of movement patterns. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control*. Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures:I. Theoretical lines of convergence. In G. E.

- Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 3-47). Amsterdam: North-Holland.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, Natural Law, and the Self-assembly of Rhythmic Movement*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kulkarni, J. E. (2003). *Time-optimal control of a swing*. Paper presented at the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Hawaiï, USA.
- Lai, Q., & Shea, C. H. (1998). Generalized Motor Program (GMP) Learning: Effects of reduced frequency of knowledge of results and practice variability. *Journal of Motor Behavior*, 30(1), 51-60.
- Laurent, M., & Temprado, J. J. (1995). Approches cognitive et écologique de l'apprentissage des habiletés motrices en sport. In H. Ripoll & J. Bilard & M. Durand & J. Keller & M. Lévêque & P. Therme (Eds.), *Psychologie du sport: Questions actuelles* (pp. 223-236). Paris: SFPS/Revue EPS.
- Lavery, J. J. (1962). Retention of simple motor skills as a function of knowledge of results. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 16, 300-311.
- Lee, D. L., Swinnen, S. P., & Verschueren, S. (1995). Relative phase alterations during bimanual skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 27(3), 263-274.
- Lee, T. D. (1998). On the dynamics of motor learning research. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69(4), 334-337.
- Lee, T. D., Blandin, Y., & Proteau, L. (1996). Effects of task instructions and oscillation frequency on bimanual coordination. *Psychological Research*, 59, 100-106.
- Lee, T. D., & Magill, R. A. (1983). The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and cognition*, 9, 730-746.
- Leplat, J. (1989). Les habiletés cognitives dans le travail. In P. Perruchet (Ed.), *Les automatismes cognitifs* (pp. 139-172). Liège, Bruxelles: Mardaga.
- Lungarella, M., & Berthouze, L. (2002). On the Interplay Between Morphological, Neural, and Environmental Dynamics: A Robotic Case Study. *Adaptive Behavior*, 10(3-4), 223-241.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Stoffregen, T. A. (1999). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance. *Human Movement Science*, 18, 31-47.

- Mayer, R. E. (1999). Designing instruction for constructivist learning. In C. M. Reigeluth (Ed.), *Instructional-design theories and models Volume II: A new paradigm of instructional theory*. Hillsdale, N.J: Erlbaum.
- Mc Donald, P. V., Van Emmerik, R. E. A., & Newell, K. M. (1989). The effects of practice on limb kinematics in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 21, 245-264.
- Monno, A., Chardenon, A., Temprado, J. J., Zanone, P. G., & Laurent, M. (2000). Effects of attention on phase transition : Behavioral and cost analysis. *Neuroscience Letters*, 283, 93-96.
- Mottet, D., & Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80(4), 235-245.
- Müller, H., & Sternad, D. (2004). Decomposition of Variability in the Execution of Goal-Oriented Tasks: Three Components of Skill Improvement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(1), 212-233.
- Muzii, R. A., Lamm Warburg, C., & Gentile, A. M. (1984). Coordination of the upper and lower extremities. *Human Movement Science*, 3, 337-354.
- Newell, A., & Rosenbloom, P. S. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. In J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (pp. 1-55). Hillsdale: Erlbaum.
- Newell, K. M. (1981). Skill learning. In D. H. Holding (Ed.), *Human Skills*. New York: Wiley.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor Development in Children: Aspects of Coordination and Control* (pp. 341-360). Dordrecht: Nijhoff.
- Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annu Rev Psychol*, 42, 213-237.
- Newell, K. M., Kugler, P. N., Van Emmerik, R. E. A., & McDonald, P. V. (1989). Search strategies and the acquisition of coordination. In S. A. Wallace (Ed.), *Perspectives on the Coordination of movement* (pp. 85-122). North-Holland: Elsevier.
- Newell, K. M., Mc Donald, P. V., & Kugler, P. N. (1991). The perceptual-motor workspace and the acquisition of skill. In J. Requin & G. E. Stelmach (Eds.), *Tutorials in Motor Neuroscience* (pp. 95-108). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Newell, K. M., & Van Emmerik, R. E. A. (1989). The acquisition of coordination: preliminary analysis of learning to write. *Human Movement Science*, 8, 17-32.
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1989). *Exploring complexity: An Introduction*. San Francisco: Freeman.

- Nourrit, D. (2000). *Etude de l'évolution des coordinations dans l'acquisition des habiletés complexes*. Université de Montpellier 1.
- Nourrit, D., Caillou, N., Deschamps, T., Lauriot, B., & Delignieres, D. (1999). *Expertise et invariance spatio-temporelle: une comparaison experts-novices en bowling*. Paper presented at the VIII<sup>e</sup> Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, Macolin, 31 Octobre-3 Novembre 1999.
- Nourrit, D., Delignieres, 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(2), 151-170.
- Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., Caillou, N., & Delignieres, D. (2000). The effects of required amplitude and practice on frequency stability and efficiency in a cyclical task. *Journal of Sports Science*, 18(3), 201-212.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. (1995a). Coupling strength in tapping a 2:3 polyrhythm. *Human Movement Science*, 14(2), 217-245.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. (1995b). Frequency-induced phase transitions in bimanual tapping. *Biological Cybernetics*, 73(4), 301-309.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1991). Bifurcations in polyrhythmic tapping: in search of Farey principles. In J. Requin & G. E. Stelmach (Eds.), *Tutorials in Motor Neurosciences* (pp. 413-431). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Peper, C. E., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1995c). Multifrequency Coordination in Bimanual Tapping: Asymmetrical Coupling and Signs of Supercriticality. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 1117-1138.
- Pew, R. W. (1974). Human perceptual-motor performance. In B. H. Kantowitz (Ed.), *Human information processing: Tutorials in performance and cognition* (pp. 1-39). Hillsdale: Erlbaum.
- Pollack, B. J., & Lee, T. D. (1992). Effects of the model's skill level on observational motor behavior. *Res Q Exerc Sport*, 63, 25-30.
- Post, A. A., Peper, C. E., & Beek, P. J. (2003). Effects of visual information and task constraints on intersegmental coordination in playground swinging. *J Mot Behav*, 35(1), 64-78.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1992). *Entre le temps et l'éternité*. Manchecourt (France): Flammarion.

- Reber, A. S. (1989). Implicit learning and tacit knowledge. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 219-235.
- Reuchlin, M. (1977). *Psychologie*. Paris: P.U.F.
- Ripoll, H. (1987). Interaction des opérations cognitives et des mécanismes sensori-moteurs dans les APS. In A. Vom Hofe & R. Simonnet (Eds.), *Recherches en Psychologie du Sport* (pp. 68-85). Paris: EAP.
- Salvendy, G. (1972). Physiological and psychological aspects of paced performance. *Acta Physiologica, Academia Scientiarum Hungaricae*, 42, 267-275.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82(4), 225-260.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. (1998). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transition and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 227-247.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. M. (1977). Controlled and automatic information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological Review*, 84, 1-66.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1989). A Quantitative Approach to Understanding the Formation and Change of Coordinated Movement Patterns. *Journal of Motor Behavior*, 21(2), 122-144.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22, 98-124.
- Scholz, J. P., Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical slowing down and switching time. *Physics Letters A*, 123, 390-394.
- Schöner, G. (1990). Dynamic theory of biological coordination: Phenomenological synergetics and behavioral information. In H. Shimizu (Ed.), *Biological Complexity and Information*. Singapore.
- Schöner, G. (1995). Recent developments and problems in human movement science and their conceptual implications. *Ecological Psychology*, 7, 291-314.
- Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, 53, 247-257.

- Schöner, G., Jiang, W. Y., & Kelso, J. A. S. (1990). A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions. *Journal of Theoretical Biology*, 142, 359-391.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988a). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, 135, 501-524.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988b). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. *Biological Cybernetics*, 58, 81-89.
- Shaw, R. E., & Alley, T. R. (1985). How to draw learning curves: their use and justification. In T. D. Johnson & A. T. Pietrewicz (Eds.), *Issues in the Ecological Study of Learning* (pp. 275-304). Hillsdale: Erlbaum.
- Shea, C. H., Wulf, G., Park, J. H., & Gaunt, B. (2001). Effects of an auditory model on the learning of relative and absolute timing. *Journal of Motor Behavior*, 33(2), 127-138.
- Shea, J. B., & Morgan, R. L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 5, 179-187.
- Sparrow, W. A. (1983). The efficiency of skilled performance. *Journal of Motor Behavior*, 19, 240-264.
- Sparrow, W. A., Hugues, K. M., Russell, A. P., & Le Rossignol, P. F. (1999). Effects of practice and preferred rate on perceived exertion, metabolic variables and movement control. *Human Movement Science*, 18, 137-153.
- Sparrow, W. A., & Irizarry-Lopez, V. M. (1987). Mechanical Efficiency and Metabolic Cost as Measures of Learning a Novel Gross Motor Task. *Journal of Motor Behavior*, 19(240-260).
- Spray, J. A., & Newell, K. M. (1986). Time series analysis of motor learning: KR versus no-KR. *Human Movement Science*, 5, 59-74.
- Stewart, I. (1998). *Dieu joue-t-il aux dés? Les mathématiques du chaos*. Manchecourt(France): Flammarion.
- Swinnen, S., Walter, C. B., Lee, T. D., & Dounskaia, N. (1996, May 28-31). *The organization and control of new patterns of interlimb coordination against the backdrop of preexisting preferred coordination modes*. Paper presented at the First Annual Congress of the European College of Sport Sciences, Nice.
- Swinnen, S., Walter, C. B., & Shapiro, D. C. (1988). The coordination of limb movements with different kinematic patterns. *Brain and Cognition*, 8(3), 326-347.

- Swinnen, S. P., Dounskaia, N., Walter, C. B., & Serrien, D. J. (1997). Preferred and Induced Coordination Modes During the Acquisition of Bimanual Movements With a 2:1 Frequency Ratio. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(4), 1087-1110.
- Swinnen, S. P., Lee, T. D., Verschueren, S., Serrien, D. J., & Bogaerds, H. (1997). Interlimb coordination: Learning and transfer under different feedback conditions. *Human Movement Science*, 16(6), 749-785.
- Swinnen, S. P., & Walter, C. B. (1988). Constraints in coordinating limb movements. In A. M. Colley & J. R. Beech (Eds.), *Cognition and Action in Skilled Behaviour* (pp. 127-143). Amsterdam: North-Holland.
- Temprado, J., Della-Grasta, M., Farrell, M., & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volleyball serve. *Human Movement Science*, 16(5), 653-676.
- Temprado, J. J., Chardenon, A., & Laurent, M. (2001). Interplay of biomechanical and neuromuscular constraints on pattern stability and attentional demands in a bimanual coordination task in human subjects. *Neuroscience Letters*, 303.
- Temprado, J. J., & Laurent, M. (2000). Cognition in action: A dynamical approach to intentional control of coordination. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 522-529.
- Temprado, J. J., & Montagne, G. (2001). *Les coordinations perceptivo-motrices*. Paris: Armand Colin.
- Temprado, J. J., Zanone, P. G., Monno, A., & Laurent, M. (1999). Intentional stabilization of bimanual coordination: a study through attentional load measure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1576-1594.
- Thelen, E. (1986). Development of coordinated movement: implications for early human development. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor skills acquisition*. Dordrecht: Nijhoff.
- Thines, G., & Lempereur, A. (1975). *Dictionnaire général des sciences humaines*. Paris: Editions Universitaires.
- Thompson, A. W. (1961). *On growth and form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tuller, B., & Kelso, J. A. (1989). Environmentally-specified patterns of movement coordination in normal and split-brain subjects. *Experimental Brain Research*, 75(2), 306-316.

- Tuller, B., & Kelso, J. A. S. (1985). Environmentally-specified patterns of movement coordination in normal and split-brain subjects. *Experimental Brain Research*, 75, 306-316.
- Turvey, M. T. (1977). Preliminaries to a theory of action with reference to vision. In R. Shaw & J. Bransford (Eds.), *Perceiving, acting and knowing: toward an ecological psychology*. Hillsdale, N.J: Erlbaum.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45(8), 938-953.
- Van Emmerik, R. E. A., Den Brinker, B. P. L. M., Vereijken, B., & Whiting, H. T. A. (1989). Preferred tempo in the learning of a gross cyclical action. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 251-262.
- Van Emmerik, R. E. A., & Wagenaar, R. C. (1996). Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1175-1184.
- Vereijken, B. (1991). *The dynamics of skill acquisition*. Free University of Amsterdam, Amsterdam.
- Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Bongardt, R., Beek, W. J., & Newell, K. M. (1997). Changing coordinative structures in complex skill acquisition. *Human Movement Science*, 16(6), 823-844.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1980). Space-time invariance in learned motor skill. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 525-533). Amsterdam: North-Holland.
- Von Holst, E. (1973). Relative coordination as a phenomenon and a method of analysis of central nervous function. In R. Martin (Ed.), *The collected papers of Erich Von Holst* (pp. 33-135). Coral Gables, FL: University of Miami (papier original publié en 1939).
- Walter, C. (1998). An alternative view of dynamical systems concepts in motor control and learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69, 326-333.
- Walter, C. B., & Swinnen, S. P. (1990). Kinetic Attraction During Bimanual Coordination. *Journal of Motor Behavior*, 22, 451-472.
- Walter, C. B., & Swinnen, S. P. (1994). The formation of "bad habits" during the acquisition of coordination skills. In H. H. S. Swinnen, J. Massion and P. Casaer (Ed.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical and cognitive constraints*. (pp. 491-513). New York: Academic Press.

- Walter, C. B., Swinnen, S. P., Corcos, D. M., Pollatou, E., & Pan, H.-Y. (1997). Coping with systematic bias during bilateral movement. *Psychological Research*, *60*, 202-213.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance in stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *10*, 683-703.
- Weeks, D. L., & Kordus, R. N. (1998). Relative frequency of knowledge of performance and motor skill learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *69*, 224-230.
- Whitacre, C. A., & Shea, C. H. (2000). Performance and learning of generalized motor programs: relative (GMP) and absolute (parameter) errors. *Journal of Motor Behavior*, *32*(2), 163-175.
- Whiting, H. T. A., Vogt, S., & Vereijken, B. (1992). Human skill and motor control: some aspects of the motor control-motor learning relation. In J. J. Summers (Ed.), *Approaches to the Study of Motor Control and Learning* (pp. 81-111). Elsevier.
- Wimmers, R. H., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, *11*, 217-226.
- Winstein, C. J., & Schmidt, R. A. (1990). Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 667-691.
- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of Human Movement* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Winter, D. A. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, *3*, 193-214.
- Winter, D. A., Prince, F., Franks, J. S., Powell, C., & Zabjick, K. F. (1996). A unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, *75*(6), 2334-2343.
- Wulf, G., Horger, M., & Shea, C. H. (1999). Benefits of Blocked Over Serial Feedback on Complex Motor Skill Learning. *J Mot Behav*, *31*(1), 95-103.
- Wulf, G., Lee, T. D., & Schmidt, R. A. (1994). Reducing knowledge of results about relative versus absolute timing: Differential effects on learning. *J Mot Behav*, *26*, 362-369.
- 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*(2), 185-211.

- Wulf, G., Shea, C. H., & Matschiner, S. (1998). Frequent feedback enhances complex motor skill learning. *J Mot Behav*, 30(2), 180-193.
- Yamanishi, J.-I., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetic*, 37, 219-225.
- Yates, F. E. (1987). *Self-organizing systems. The emergence of order*. New York: Plenum.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 403-421.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(5), 1454-1480.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1994). The coordination dynamics of learning. In H. H. S. Swinnen, J. Massion and P. Casaer (Ed.), *Interlimb Coordination: Neural, Dynamical, and Cognitive Constraint* (pp. 461-490). San Diego: Academic Press.
- Zanone, P. G., Monno, A., Temprado, J. J., & Laurent, M. Shared dynamics of attention cost and pattern stability in the control of bimanual coordination. *Human Movement Science*.
- Zanone, P. G., Monno, A., Temprado, J. J., & Laurent, M. (2001). Shared dynamics of attentional cost and pattern stability. *Human Movement Science*, 20(6), 765-789.
- Zanone, P. G., Temprado, J. J., & Monno, A. (1999). Attentional load covaries with pattern stability in the control of bimanual coordination, *Studies in event perception action action V* (pp. 297-300). New Jersey: LEA.

## Nature des transitions dans l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'habiletés complexes

### Résumé :

Ce travail avait pour but d'analyser l'évolution des coordinations lors de l'apprentissage d'une habileté motrice complexe afin de comprendre la nature des relations entre le comportement du débutant et celui de l'expert. Pour cela, quatre études portant sur de tâches totalement nouvelles sollicitant l'ensemble du corps ont été réalisées. Durant celles-ci, l'évolution des coordinations adoptées par les participants au cours de la pratique a été observée essai par essai. Ces études ont permis de montrer que l'apprentissage se définissait par une recherche d'efficacité, correspondant à une solution optimale. Dès lors que cette solution entre en compétition avec le comportement du débutant, l'apprentissage se caractérise par une phase d'alternance entre les comportements débutant et expert, semblant correspondre à une phase d'*intermittence*, renvoyant à une bifurcation de type *saddle-node*. Cette phase apparaît plus ou moins précocement dans la pratique en fonction des contraintes imposées par la tâche, qui peuvent amener les coordinations spontanées à résister longtemps à toute évolution, ou permettre une longue phase d'exploration des coordinations possibles. Entre ces deux extrêmes, une tâche suffisamment contraignante semble permettre aux sujets d'entrer rapidement dans la phase de transition. Ainsi, les coordinations débutantes semblent servir de point d'appui à l'exploration de l'espace de travail et à l'émergence de la coordination experte, suggérant une sorte de coopération entre ces premiers modes de coordination et la solution finalement adoptée au terme de l'apprentissage.

Mot-clés : Apprentissage moteur- Systèmes dynamiques- Habiletés complexes- Coordinations

### Abstract :

The aim of this work was to analyse the evolution of coordination during learning a gross motor skill, in order to understand the nature of the relationship between novice and expert behaviour. We realised four studies during which we observed, trial by trial, the evolution of the coordination modes adopted by participants confronted during an extended practice period, to new whole body action tasks. The results showed that learning could be defined as the search of an efficient, optimal solution. If this solution is in competition with novice behaviour, learning is characterized by an alternation period between novice and expert behaviour, which could correspond to an *intermittency* period, referring to a *saddle-node* bifurcation. This period appears more or less precociously during practice, depending on the nature of the constraints imposed by the task, which could lead to a strong persistence of spontaneous coordination or conversely to a prolonged exploration of the perceptual motor workspace. Between these two extreme cases, a sufficiently constrained task could allow a quick entrance in the transition period. It seems possible that novice coordination served as an anchor point for exploring the work space in order to access the expert behaviour, suggesting a kind of cooperation between this first coordination mode and the final solution adopted at the end of learning.

Key-words: Motor learning- Dynamical system- Gross motor skills- Coordination