

THESE DE DOCTORAT

Faculté des Sciences du Sport

Laboratoire :
EA 2991 Sport, Performance, Santé

Ecole Doctorale :
EDA 168 Sciences Chimiques et Biologiques pour la Santé

Université de MONTPELLIER I

**ETUDE DE L'EVOLUTION DES COORDINATIONS
DANS L'ACQUISITION DES HABILITES COMPLEXES**

Présentée par

Déborah NOURRIT

Soutenue le 18 décembre 2000

Devant le jury composé de :

- Temprado, J-Jacques, H.D.R. Université de la Méditerranée (rapporteur),
- Zanone, Pier G., Professeur, Université Toulouse (rapporteur),
- Delignières, Didier, Professeur, Université Montpellier I (directeur de thèse),
- Mottet, Denis, Professeur, Université Montpellier I,
- Nougier, Vincent, Professeur, Université de Grenoble ,
- Varray, Alain, Professeur, Université Montpellier I.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
TABLES DES MATIERES	2
INTRODUCTION GENERALE	4
CHAPITRE I : LES MODES DE COORDINATION PREFERENTIELS LORS DES PREMIERES ETAPES DE L'APPRENTISSAGE.	14
1-1- INTRODUCTION	14
1-2- METHODE	23
1-2-1- Sujets	23
1-2-2- La tâche.....	23
1-2-3- Le protocole.....	24
1-2-4- Analyse des données.....	26
1-3-RESULTATS.....	30
1-3-1- Amplitude des oscillations pendulaires.....	30
1-3-2- Variabilité des angles de l'épaule et de la hanche.....	31
1-3-3- Rapport de fréquence et phase relative.....	32
1-4-DISCUSSION	34
CHAPITRE II : LES EFFETS DE LA CONTRAINTE EN TERME D'AMPLITUDE SUR LA STABILITE ET L'EFFICIENCE.....	40
2-1- INTRODUCTION	40
2-2- METHODE	45
2-2-1- Sujets	45
2-2-2-Dispositif.....	46
2-2-3- Procédure.....	46
2-2-4- Variables dépendantes	47
2-2-5- Analyses statistiques.....	48
2-3- RESULTATS.....	49
2-3-1- Sessions de pratique.....	49
2-3-2- Tests de transfert.....	56
2-4- DISCUSSION	57
CHAPITRE III : MODELISATION D'UNE HABILITE COMPLEXE : LES OSCILLATIONS AU SIMULATEUR DE SKI	62
3-1- INTRODUCTION	62
3-2- MODELISATION.....	65
3-3- METHODE	67
3-3-1- Protocole expérimental.....	68
3-3-2- Réduction des données	68
3-4- RESULTATS.....	71
3-4-1- Modélisation de groupe.....	71
3-4-2- Modélisations individuelles.....	75
3-5- DISCUSSION	79
3-6- CONCLUSION	84

CHAPITRE IV : ETUDE LONGITUDINALE DE L'ACQUISITION D'UNE HABILETE COMPLEXE : MODELISATION ET STRATEGIES DE FORÇAGE POUR LES OSCILLATIONS AU SIMULATEUR DE SKI MODIFIE	86
4-1- INTRODUCTION	86
4-2- METHODE	88
4-2-1- <i>Sujets</i>	88
4-2-2- <i>Dispositif expérimental</i>	88
4-4-3- <i>Protocole</i>	89
4-4-4- <i>Réduction des données</i>	91
4-5- RESULTATS	94
4-5-1- <i>Résultats de la modélisation du déplacement de la plate-forme</i>	94
4-5-2- <i>Résultats du décalage de phase en relation avec les résultats de modélisation</i> .	104
4-6- DISCUSSION	105
4-7- ETUDE COMPLEMENTAIRE SUR LA MODELISATION DES OSCILLATIONS SUR SIMULATEUR DE SKI	111
4-7-1- <i>Méthode</i>	111
4-7-2- <i>Résultats</i>	113
4-8- CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE	120
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	123
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	131

INTRODUCTION GENERALE

Les recherches sur l'acquisition des habiletés motrices, n'ont paradoxalement suscité que peu d'intérêt dans le domaine de la psychologie expérimentale. Jusqu'aux années soixante-dix, les études portaient majoritairement sur les mécanismes de la perception et des processus cognitifs mis en jeu dans les activités mnésiques et langagières, les temps de réaction, les liaisons sensori-motrices, mais très peu traitaient des déterminants de l'apprentissage moteur (Bonnet, Guiard, Requin & Semjen, 1994). Les investigations dans le domaine de la motricité étaient majoritairement confinées au problème du contrôle moteur. Cette focalisation exclusive était justifiée par l'argument fait qu'il n'était pas possible de comprendre l'apprentissage sans avoir connaissance du processus de contrôle des mouvements à un moment donné (Whiting, Vogt, Vereijken, 1992). Ce n'est que plus tard, avec l'intérêt porté sur le couplage perception-action et les controverses au propos des théories prescriptives, qu'un intérêt nouveau s'est manifesté à l'égard de la problématique de l'apprentissage moteur (Glencross, Whiting & Abernethy, 1994).

Le domaine du contrôle moteur tente de répondre à la question de la production d'une réponse motrice, dans une tâche le plus souvent familière au sujet, c'est-à-dire faisant appel à une motricité antérieurement apprise. Le contrôle moteur s'intéresse à l'instantanéité du comportement, à «l'ici et maintenant» (Whiting *et al.*, 1992). Ce domaine a bénéficié d'un grand investissement aux dépens de celui de l'apprentissage dont le développement a été strictement inféodé aux avancées dans le domaine du contrôle moteur. Ces deux problématiques ont d'ailleurs souvent été traitées de manière simultanée (Vereijken, 1991). Et pourtant, si pour l'acquisition d'une habileté, le contrôle reste bien entendu un élément essentiel, il ne peut masquer l'importance du processus d'acquisition lui-même.

Parmi les théories développées dans les domaines du contrôle moteur et de l'apprentissage, la théorie de la boucle fermée d'Adams (1971) constitue une référence et une des bases de l'approche cognitiviste. Conséquemment à l'existence d'une trace mnésique et perceptive, le sujet disposerait de programmes lui permettant de sélectionner et de lancer un mouvement tout en réduisant l'écart entre la référence et l'exécution effective, ceci grâce au retour d'information issu du mouvement. Les propositions d'Adams ont rapidement été suivies, en 1975, par celles de Schmidt, qui en introduisant le concept de programme moteur

généralisé, pertinent et adaptable pour une classe de tâches, résout le problème économique du stockage laissé en suspend par la théorie précédente.

Ces théories présentent cependant certaines zones d'ombre. La plus importante, dans le cadre de notre approche, est celle de la nouveauté: Comment le sujet peut-il satisfaire aux exigences d'une tâche entièrement inédite, pour laquelle il ne dispose pas de programme moteur généralisé pertinent? Même si Schmidt tente de répondre à ce problème par la possibilité d'adapter les programmes, d'en transférer la structure pour répondre aux exigences d'une nouvelle tâche, le raisonnement reste circulaire et ne résout pas le problème de l'origine de ces programmes moteurs généralisés. Par ailleurs, avec cette prédominance consacrée à l'action du système nerveux central, l'importance des variables de l'environnement et des informations sensorielles qui influencent directement le contrôle du mouvement, a été clairement négligé.

De même, ces théories tendent davantage à s'intéresser aux produits de l'apprentissage qu'au processus de leur construction. Il est symptomatique que l'évaluation scientifique de l'apprentissage passe de manière obligée par les tests de rétention ou de transfert. Durabilité et transversalité constituent des indicateurs pertinents de la qualité des programmes moteurs généralisés, mais ne disent pas grand chose sur leur genèse.

De fait, les travaux réalisés depuis deux décennies sur l'apprentissage moteur portent davantage sur les conditions d'apprentissage, sur les facteurs susceptibles de l'accélérer ou d'en améliorer l'adaptabilité, que sur le processus d'acquisition lui-même. On peut citer notamment la masse imposante d'études sur le feed-back augmenté (Bilodeau & Bilodeau, 1958; Magill, 1973 ; Newell & Walter, 1981 ; Newell, 1976 ; Cooper & Rosthstein, 1981 ; Schmidt, 1988 ; 1993). La connaissance du résultat, condition *sine qua non* de l'apprentissage (Annett & Kay, 1957) finit par faire de l'ombre au processus lui-même...

On peut avoir la même lecture des multiples travaux sur la variabilité des conditions d'apprentissage (Catalano & Kleiner, 1984; Hautala & Kidd, 1990; Kelso & Norman, 1978; Kerr & Booth, 1978; Lai & Shea, 1998; Pigott & Shapiro, 1984; Shea & Kohl, 1990; Whitacre & Shea, 2000; Wulf & Schmidt, 1997) et l'interférence contextuelle (Shea & Morgan, 1979 ; Husak, Cohen & Schandler, 1991; Wrisberg, 1991; Wulf & Lee, 1993). Ces travaux comparent l'efficacité de stratégies différenciées d'enseignement, généralement sur le critère de l'adaptabilité de l'habileté finale. Et ces expérimentations nous apprennent

d'avantage, nous semble-t-il, sur le fonctionnement de l'habileté constituée que sur l'installation progressive de cette habileté. Ces recherches sont restées longtemps focalisées sur la question du "comment apprendre?", et accessoirement sur celle du "qu'est-ce qui est appris?".

Il faudra attendre un passé récent pour que la question du "qu'est-ce qu'apprendre?", soit réellement envisagée. Il faut évoquer à ce niveau, pour ne citer que les initiateurs de cette nouvelle perspective, Vereijken (1991), Zanone et Kelso (1992), Swinnen et Walter (1988), Walter et Swinnen (1990). Les caractéristiques communes, et novatrices, de ces travaux renvoient notamment à (1) un intérêt pour la coordination motrice elle-même, et non aux performances (chronométriques ou autres) qu'elle permet de réaliser, (2) une prise en compte des conditions initiales de l'apprentissage, c'est-à-dire des tendances spontanées de coordination sur et/ou contre lesquelles le nouveau pattern devra se greffer, et enfin (3) l'évolution temporelle de la coordination, au fil des essais de pratique. On se situe bien ici au cœur du processus d'acquisition: il s'agit d'en décrire le décours, d'en saisir les contraintes et la logique.

Ces approches contrastées renvoient évidemment à des regards différents sur la nature réelle de l'apprentissage (Schöner, Zanone & Kelso, 1992). Pour les approches cognitivistes, et afin de répondre aux demandes de la tâche, l'apprentissage relèvera de l'optimisation des différents processus du traitement de l'information. Il correspond donc à l'acquisition de prescriptions pour l'action qui satisferont plus convenablement à la réalisation du but de la tâche (Newell, 1991). Pour l'approche dynamique, il consistera en la construction et/ou en la stabilisation d'un état attracteur comportemental (Zanone & Kelso, 1992), de sorte qu'il se caractérise par la découverte et la stabilisation, dans l'espace des contraintes de la tâche, d'une relation entre des variables informationnelles et des variables essentielles de la coordination (Laurent & Temprado, 1995). En dépit de ces divergences fondamentales, la plupart des définitions s'accordent cependant à dire que l'apprentissage est un processus de modification et de stabilisation du comportement, ceci grâce à une pratique répétée:

- De Montpellier(1964) : « L'apprentissage consiste en une modification systématique de conduite en cas de répétition de la même situation ».

- Reuchlin(1977) : « Il y a apprentissage lorsqu'un organisme placé plusieurs fois dans la même situation, modifie sa conduite de façon systématique et relativement durable ».

- Schmidt (1982) : « L'apprentissage moteur est un ensemble de processus associés à l'exercice ou l'expérience conduisant à des modifications relativement permanente du comportement habile ».

- Schöner, Zanone & Kelso (1992) : « L'apprentissage peut-être alors défini comme le changement dans la dynamique des coordinations pour acquérir des solutions stables du pattern à apprendre ».

Quatre notions apparaissent de manière récurrente dans ces définitions, et nous semblent essentielles pour réellement rendre compte de l'apprentissage: le processus, la stabilité, la modification et la pratique.

La notion de *processus* renvoie à un développement temporel de phénomènes qui marquent chacun une étape. Il constitue un ensemble de phénomènes dynamiques dont on peut suivre l'évolution et les étapes ou états successifs (Thines et Lempereur, 1975). L'évolution temporelle de l'état du système peut être décrite comme un processus (succession continue d'état) par un calcul infinitésimal ; cette description se faisant à partir des mouvements effectués par un point représentant l'état du système. Par conséquent, le processus doit être appréhendé dans son acception dynamique. C'est une critique majeure que l'on peut adresser à de nombreuses approches antérieures de l'apprentissage, de n'avoir étudié ce processus qu'au travers de la comparaison d'états (soit dans des paradigmes experts-novices, soit en comparant diverses «étapes» ponctuelles de l'apprentissage). Une étude dynamique de l'apprentissage devrait naturellement s'orienter vers l'analyse de séries temporelles, tentant de mettre en évidence la logique de construction progressive de l'habileté (Spray & Newell, 1986). Il nous semble difficile à ce niveau de se contenter d'une démarche reposant sur une comparaison pré-test/post-test, qui constitue néanmoins le standard de la plupart des expérimentations réalisées à ce jour.

La notion de modification ou de changement mérite également d'être approfondie. Dans le langage courant, il est habituel d'employer indifféremment les deux termes de changement et de modification. Pourtant ils présentent des différences terminologiques notables. Une modification est un «changement qui ne transforme pas complètement» (Dictionnaire, Hachette, 1981), en d'autres termes une évolution quantitative. Par contre le changement caractérise le passage d'un état à un autre (ibidem), une transformation qualitative. Les approches classiques, d'inspiration cognitiviste, de l'apprentissage, mettent plutôt en

évidence des modifications de nature quantitative : un programme moteur est enrichi, affiné, complexifié, mais fondamentalement il ne change pas de nature. Il existe une solution de continuité entre le comportement du débutant et le comportement de l'expert. Ce caractère continu des modifications liées à l'apprentissage est clairement illustré par la loi puissance, invoquée comme une loi générale de l'apprentissage. Ainsi, le processus d'apprentissage est compris au travers d'une modification du comportement. Les perspectives dynamiques introduisent une nouvelle conception des altérations du comportement lors du processus d'apprentissage, marquée par des ruptures qualitatives importantes : ainsi, pour Zanone et Kelso (1992), l'apprentissage peut être considéré comme une transition de phase, entre un premier comportement correspondant à un attracteur de la dynamique spontanée du système, et un second comportement correspondant au pattern à apprendre. Il semblerait donc qu'il soit préférable d'employer le terme de modification lorsqu'on se situe dans une perspective cognitiviste de l'apprentissage moteur, et le terme changement pour une approche dynamique.

Une transition de phase (ou bifurcation) a généralement dans le cadre de l'approche dynamique, un caractère abrupt. Il s'agit d'un changement qualitatif brutal du comportement du système. Un exemple princeps, dans l'application de cette approche au domaine du contrôle moteur, a été la mise en évidence d'une transition de phase, dans les tâches d'oscillations bi-manuelles, entre le pattern en anti-phase (caractérisé par la contraction simultanée de muscles non-homologues) vers le pattern en phase (caractérisé par la contraction simultanée de muscles homologues), lorsque l'on accroît la fréquence d'oscillation du système (Haken, Kelso & Bunz, 1985). La fréquence d'oscillation est alors considérée comme un *paramètre de contrôle*, paramètre non spécifique (dans le sens où il ne prescrit pas la direction de la bifurcation), qui lorsque qu'il dépasse une valeur critique altère qualitativement le comportement du système. Une telle bifurcation est typiquement précédée d'un accroissement de la variabilité du comportement.

Le caractère abrupt des bifurcations, en ce qui concerne l'apprentissage, mérite cependant d'être discuté. Une transition brutale correspondrait à une forme d'*insight*, comportement rarement observé dans le cadre de la motricité. Dans le cas des coordinations bi-manuelles, la transition s'opère entre deux attracteurs initialement présents dans la dynamique intrinsèque du système, et se trouve consécutive à la disparition de l'un d'entre eux. La transition est abrupte car l'attracteur cible est immédiatement disponible, avec un haut niveau de stabilité. Dans le cadre de l'apprentissage, on peut faire l'hypothèse que l'attracteur

de destination ne présentera pas les mêmes caractéristiques: sa stabilité ne s'installera que progressivement, au fur et à mesure de son exercice. Dans ce cas, on peut supposer que la bifurcation passera par une phase de bi-stabilité au cours de laquelle les deux attracteurs, correspondant respectivement au comportement initial et au comportement final, seront simultanément disponibles, bien que présentant de piètres stabilités intrinsèques. On peut donc s'attendre à une phase d'instabilité, dont la durée pourrait être assez longue, à l'échelle du temps d'observation.

La mise en évidence du caractère continu ou discontinu de l'apprentissage, ou des caractères abrupt ou plus progressif des discontinuités, nécessite de toute évidence la prise en compte de la dimension temporelle. Prigogine (1993) souligne l'importance de la flèche du temps, dans l'étude des systèmes, dans le sens où elle joue un « rôle créateur de structure ». On ne peut donc pas évoquer les propriétés d'auto-organisation, de changement sans prendre en considération la temporalité. Dans le paradigme des mathématiques du chaos, on observe par exemple des transitions, des apparitions d'ordre ou de désordre conséquemment à un nombre x d'itération d'une fonction logistique (du type : $f(x)=ax(1-x)$). Il est aisé de comparer et d'assimiler la pratique et l'exercice à une forme d'itération, lorsqu'on considère que l'on répète x fois le même mouvement. Une des particularités de l'itération étant de s'inscrire dans le temps, la pratique, par voie de conséquence ne peut échapper à cette temporalité et à ses conséquences. Or, c'est un autre reproche que l'on peut adresser à de nombreuses expérimentations sur l'apprentissage, de ne pas laisser suffisamment de temps, ou d'essais aux sujets pour réellement modifier leur comportement et stabiliser leurs nouveaux modes de réponse (Newell, 1991) Certains travaux, récents ou plus anciens, ont heureusement pris en compte cette exigence (Schneider & Shiffrin, 1977 ; Swinnen., Dounskaia, Walter & Serrien ; 1997, Vereijken, 1991 ; Wulf & Weigelt, 1997; Wulf & Schmidt, 1997).

Une autre notion importante est la stabilité. Les définitions que nous avons précédemment relevé concernent avant tout la stabilité du comportement expert. Un certain nombre de travaux ont en effet montré 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, & Delignières, 1999 ; Viviani et Terzuolo, 1980). Du point de vue dynamique, la stabilité est une caractéristique essentielle des attracteurs du système (Kelso, DeGuzman & Holroyd, 1991 ; Zanone & Kelso, 1992). Une autre caractéristique essentielle des attracteurs, dans le

domaine de la motricité, est l'efficacité énergétique (Sparrow & Irizarry-Lopez, 1987; Brisswalter, 1994, Durand, Geoffroi, Varray & Préfaut, 1994, Holt, Jeng & Ratcliffe, 1995, Sparrow, Hughes, Russell & Rossignol, 1999). Le processus d'apprentissage est marqué par une optimisation progressive de l'efficacité, et ce phénomène présente une telle généralité que Sparrow (1983) voit dans la quête de l'efficacité un des moteurs de l'apprentissage.

Les problèmes de stabilité ne concernent pas que les étapes ultimes de l'apprentissage. Le comportement du débutant est en effet capté par des attracteurs spontanés, caractérisant la dynamique intrinsèque du système. Walter et Swinnen (1994) insistent sur l'importance de la prise en compte de ces attracteurs spontanés, pour comprendre le comportement du débutant et les difficultés qu'il aura à s'en émanciper pour rejoindre le pattern requis. Et c'est bien ici la stabilité intrinsèque de cet attracteur initial qui pose problème. Le sujet ne pourra engager une bifurcation vers le pattern à apprendre que dans la mesure où il pourra déstabiliser son mode de coordination initial. Walter et Swinnen (1992) proposent dans cette optique une aide à l'apprentissage basée sur la réduction de la stabilité intrinsèque de l'attracteur initial, pour favoriser l'adoption d'un nouveau comportement.

Une dernière remarque concerne la nature des tâches expérimentales utilisées dans les recherches sur l'apprentissage. Traditionnellement, l'effort de recherche s'est focalisé sur des tâches simples, tels que les tâches de positionnement linéaire utilisées par Adams (1971). Si ces tâches avaient quelques pertinence au vu des hypothèses théoriques des auteurs, leur simplicité (révélée par le nombre réduit de degrés de liberté sollicités, au niveau comportemental) leur interdisait clairement de constituer un modèle pour des apprentissages moteurs plus écologiques. Comme le souligne Newell (1991), les processus non-linéaires typiques de l'évolution des systèmes complexes ont peu de chance d'apparaître dans un système ne comprenant qu'un seul degré de liberté, et les descriptions continues de l'apprentissage que ces expérimentations ont pu offrir constituent certainement un artefact lié à cette simplicité.

Les expériences plus récentes de Zanone et Kelso (1992 ;1997), ou de Walter et Swinnen (1992 ; 1994) ont porté sur des tâches de coordination, dans lesquelles les sujets devaient apprendre à réaliser des coordinations complexes (en termes de rapports de fréquence et/ou de décalage de phase) entre deux effecteurs. Ce type d'approche a renouvelé largement le regard des chercheurs, qui se sont notamment intéressés à l'évolution de variables collectives, capturant la globalité du comportement, au lieu des variables

dépendantes de produit classiquement utilisées antérieurement (temps de mouvement, temps de réaction, scores d'erreur, etc...). Ces variables collectives ou paramètres d'ordre, rendant compte de manière quantitative de patterns de coordination par essence qualitatif, sont évidemment plus à même de révéler des modifications dans le comportement des sujets au cours de l'apprentissage. Par ailleurs, ces tâches de coordination représentent une claire avancée en terme de complexité : on rentre là dans l'étude de système comprenant de multiple degrés de liberté, y compris au niveau macroscopique, dont l'évolution a toutes les chances de révéler de la non-linéarité.

Ces tâches de coordination restent cependant le plus souvent confinées au travail simultané de deux effecteurs, et les expérimentations relatives à des tâches plus écologiques restent rares. Une des caractéristiques de la motricité usuelle, et notamment dans le domaine sportif, est de solliciter l'ensemble des segments corporel, c'est-à-dire des *coordinations globales*. Des expérimentations comme celles de Sparrow(1983), Holt et al.(1995) et Whitall et Getchell (1996) se sont attachées à analyser des tâches sollicitant ce type de coordination mais elles concernent cependant des habiletés sur-apprises (marche, marche en claquant des mains). Très peu d'expérimentations regroupent à la fois les critères de globalité, de réalité écologique et de nouveauté. L'une des premières à avoir investi ce type de tâche « complète » est Vereijken (1991), dans ses travaux sur le simulateur de ski.

Le projet qui a guidé ce travail de thèse est dans la lignée des réflexions qui précèdent. Il s'agissait pour nous, dans la lignée de travaux de Vereijken, d'approfondir l'étude du processus d'acquisition des habiletés complexes, et notamment des habiletés sportives. Parce qu'il nous a semblé le mieux à même de rendre compte de la motricité complexe, globale, coordinative, à laquelle nous nous intéressions, c'est dans le cadre théorique de l'approche des systèmes dynamiques que nous avons situé notre approche.

Cette thèse est organisé par trois axes de travail, auxquels chaque expérimentation présentée a pu apporter sa contribution:

- Le premier est celui du comportement adopté par le débutant, face à une tâche nouvelle. Il s'agit d'une question essentielle, d'un point de vue théorique, à laquelle l'approche cognitiviste n'a guère pu apporter de réponse satisfaisante. Par ailleurs, il nous semble que cette problématique correspond à un besoin important des intervenants (enseignants, entraîneurs), souvent désemparés face aux réponses motrice des novices.

- Le second est celui de la détermination des variables susceptibles de capturer de manière globale le comportement. Notre souci de travailler sur des tâches écologiques a pour revers de nous obliger à rendre compte de systèmes éminemment complexes. Nous tenterons de montrer que des variables macroscopiques, de (relativement) faible dimensionalité, sont capables de procurer des modèles du comportement tout à fait pertinents.

- Le troisième renvoie à la nature de l'évolution des modes de coordination, lors du processus d'apprentissage. Il s'agit d'un domaine où l'on trouve davantage de théories que de données expérimentales incontestables.

Le chapitre 1 est consacré à l'étude des modes de coordination préférentiels lors des premières étapes de l'apprentissage d'une habileté gymnique. Un certain nombre d'auteurs ont montré que ces modes spontanés de coordination constituait la base sur laquelle devait se construire l'apprentissage (voir par exemple Zanone et Kelso, 1992; Swinnen, Walter, Lee & Dounskaia, 1996). Il s'agira dans ce premier travail de montrer que les principes caractérisant la dynamique intrinsèque des tâches "classiques" de l'approche dynamique (les tâches bimanuelle) sous-tendent également les coordinations spontanées dans des tâches plus complexes, sollicitant l'ensemble du corps. Par ailleurs, il s'agira d'évaluer la résistance de ces modes initiaux à la pratique.

Au cours du second chapitre, notre réflexion se portera sur les effets des contraintes de la tâche sur l'efficacité de l'apprentissage. Si l'on considère les contraintes comme des facteurs restreignant les possibilités d'action du système, un accroissement du niveau de contrainte devrait générer une canalisation du comportement dans l'espace de la tâche. On fait l'hypothèse de ce fait d'une plus faible variabilité comportementale à haut niveau de contrainte, comparé à des situations dans lesquelles le niveau de contraintes est plus faible. Cette canalisation comportementale est-elle néanmoins bénéfique en termes d'apprentissage ? C'est ce que tentera de vérifier cette expérimentation, en analysant notamment les interactions entre contraintes et pratique. Ce travail est réalisé sur le simulateur de ski, précédemment exploité dans diverses investigations dédiées à l'apprentissage (voir en particulier Vereijken, 1991).

L'étude des coordinations complexes se heurte souvent au problème de l'identification des variables pertinentes, susceptibles de capturer de manière globale le comportement du système. Une solution fréquemment adopté est de mesurer le décalage de phase entre les

principaux oscillateurs à l'œuvre dans la coordination (Vereijken, 1991 ; Delignières, Nourrit, Sioud, Leroyer, Zattara & Micaléff, 1998). Dans le troisième chapitre, nous tenterons d'exploiter une autre voie : la modélisation de la dynamique d'un point du système, en tant qu'oscillateur auto-entretenu, selon les principes proposés par Beek et Beek (1988). Basé sur les données cinématiques de l'expérimentation précédente, ce travail montrera qu'il est possible de décrire avec précision le comportement du système, sous la forme d'une équation de mouvement comprenant des fonctions de raideur et d'amortissement non-linéaires, dont les coefficients varient de manière systématique, d'une part sous l'influence des contraintes de la tâche, et d'autre part sous l'effet de la pratique.

Les résultats du travail précédent seront exploités dans le dernier chapitre, dont le but est d'étudier l'évolution longitudinale de comportement, au fur et à mesure de l'apprentissage d'une habileté complexe. Cette expérimentation est également réalisée sur le simulateur de ski. Notre but sera alors de démontrer que l'apprentissage peut être considéré comme une transition de phase, entre un premier mode spontané de coordination, déterminé par la dynamique intrinsèque du système, et un autre comportement, qualitativement distinct du précédent, permettant une exploitation plus efficace des caractéristiques de la tâche.

CHAPITRE I : Les modes de coordination préférentiels lors des premières étapes de l'apprentissage.

1-1- Introduction

Que ce soit du point de vue des approches prescriptives ou de celui des approches émergentes, l'apprentissage ne se réalise pas à partir d'une *tabula rasa*, mais est plutôt conçu comme l'évolution et le perfectionnement de capacités préexistantes. Certaines théories cognitivistes suggèrent sur le rôle que pourraient jouer les programmes moteurs généralisés (P.M.G.) précédemment stockés en mémoire. Face à une tâche nouvelle, l'un de ces programmes serait sélectionné, permettant d'organiser une première réponse, fût-elle grossière, aux exigences de la tâche. L'apprentissage consisterait en l'adaptation de ce P.M.G. pour le mettre en adéquation avec le but assigné (Schmidt, 1982).

Cette approche apporte cependant peu d'information sur l'acquisition du P.M.G., ses limites, sur le choix et la procédure de redéfinition des paramètres et plus particulièrement sur l'établissement des P.M.G. lors des premières étapes de l'acquisition d'une habileté nouvelle (Glencross *et al.*, 1994). Elle semble en outre mieux à même de rendre compte d'un problème de transfert que de celui d'un réel apprentissage (Delignières & Nourrit, 1997). Par ailleurs, cette conception de l'apprentissage pose un évident problème de régression à l'infini, si tout P.M.G. résulte de l'adaptation d'un P.M.G. antérieurement stocké en mémoire. Enfin, lors de la confrontation à une tâche entièrement nouvelle, quel P.M.G. peut-il être sélectionné?

D'autres théories cognitives ont investi le domaine de l'apprentissage au travers des systèmes experts et plus particulièrement les différences qui subsistent dans les structures de connaissances des experts et des débutants (par exemple ; French & Thomas, 1986). Ces auteurs insistent sur l'importance des bases de connaissances déclaratives et procédurales qui guideraient les sujets dans les nouvelles tâches (Kerr *et al.*, 1992 ; Wall *et al.*, 1985). Comme précédemment, ce type de théorie peut présenter un intérêt pour une première confrontation à une tâche constituant une variante d'une tâche préalablement apprise. Mais quelles connaissances peut-on utiliser lors d'une tâche complètement nouvelle ?

Le caractère inédit de la tâche constitue un point théorique essentiel. On peut évoquer à ce propos la distinction proposée par Magill et Schvender-Zohdi (1995), entre les tâches

de contrôle et de coordination. Pour les premières, le sujet peut se contenter d'adapter une coordination déjà apprise, d'en ajuster spécifiquement les paramètres. Ce n'est que pour les secondes que le sujet, faute de solution disponible dans son répertoire, devra construire une coordination inédite. D'une manière générale, les théories cognitives du comportement moteur nous ont semblé mieux à même de rendre compte de l'adaptation des sujets à des tâches de contrôle, que de leur confrontation à des tâches de coordination.

Les théories dynamiques ont permis de jeter un regard nouveau sur le comportement des débutants. Ces théories considèrent que le comportement, plutôt que provenant de représentations, de modèles internes du mouvement, émerge des propriétés d'auto-organisation du système. Un système est assujéti à différentes contraintes relatives tant à l'organisme devant agir, qu'à l'environnement et à la tâche (Higgins, 1985 ; Newell, 1986). Ces contraintes imposent les possibles du mouvement (mais aussi les impossibles), déterminant la dynamique intrinsèque du système. Elles réduisent les degrés de liberté du systèmes, en limitant ainsi les possibilités d'action. De l'interaction des différentes contraintes émerge une réponse, que l'on peut considérer comme la plus adaptée, en fonction des contraintes pesant à un moment donné sur le système. Une telle approche rend concevable l'émergence d'un comportement spontané, face à une tâche inédite.

L'identification des modes de coordination spontanés, et plus généralement l'identification des principes généraux présidant à leur définition constitue un enjeu fondamental pour l'approche dynamique de l'apprentissage (Zanone & Kelso, 1992). Elle permet de déterminer quels états du système seront adoptés de manière préférentielle, et à l'inverse quels états resteront a priori difficilement accessibles, du fait de leur faible stabilité intrinsèque. Ainsi, dans une tâche d'apprentissage, il est possible que le pattern à apprendre s'inscrive dans la gamme des comportements préférentiels du système. Dans ce cas, le pattern à apprendre converge avec la dynamique intrinsèque, et l'apprentissage consiste à optimiser un mode de coordination appartenant déjà au répertoire du système. A l'inverse, le pattern à apprendre peut entrer en compétition avec la dynamique intrinsèque, dans la mesure où il vise un comportement a priori instable. Dans ce cas, l'apprentissage devra contraindre les tendances spontanées de coordination, pour installer une nouvelle zone de stabilité dans la dynamique du système (Zanone et Kelso, 1992). Dans le premier cas, on peut considérer que le sujet pourra exploiter la dynamique intrinsèque, qui constituera une ressource essentielle pour l'action. Dans le second, la dynamique représente une contrainte dont il faudra

s'émanciper pour envisager l'adoption d'un nouveau type de comportement. Cette distinction entre situations de convergence ou de compétition, est essentielle, et renouvelle les conceptions classiques sur la difficulté des tâches, principalement reliées à la complexité informationnelle.

Les modes de coordinations spontanément adoptés dans une tâche motrice découlent donc des multiples contraintes qui pèsent sur le système. Cette approche ne nie évidemment pas l'influence d'apprentissages antérieurs, notamment sur des tâches proches de celle proposée au sujet. Mais ces apprentissages antérieurs sont considérés comme une contrainte particulière, interagissant avec les autres, et influençant partiellement le comportement résultant. Zanone et Kelso (1992) ont ainsi montré que la dynamique intrinsèque, au terme du processus d'apprentissage d'un pattern initialement absent du répertoire du système, était profondément modifiée, et représentait l'intégration de tendances « naturelles » de coordination, et de tendances nouvelles, imposées au système par l'apprentissage. Ainsi de nouveaux attracteurs apparaissent, celui correspondant au pattern visé par l'apprentissage mais également d'autres correspondant notamment au pattern symétrique. Par ailleurs, si les attracteurs « naturels » du système sont toujours présents, certains semblent avoir été déstabilisé par l'apprentissage du nouveau pattern, du moins temporairement.

C'est ainsi que l'on peut dire que la dynamique intrinsèque dans une situation donnée est dépendante à la fois des tendances naturelles du système mais aussi de l'histoire du sujet. Il existe une «myriade» de facteurs qui jouent un rôle dans le comportement ; autant morphologique, biomécanique que psychologique et socioculturel (Higgins, 1985). A noter que lorsque l'on parle d'histoire du sujet, on n'évoque d'ailleurs pas uniquement les apprentissages délibérés, réalisés dans le cadre scolaire ou sportif. Il s'agit également de l'imprégnation plus souterraine, implicite, des modèles culturels, des « techniques du corps » (Mauss, 1950) valorisées à un moment donné par une société (Bril, 1986a, 1986b). Il n'en demeure pas moins que l'on peut distinguer des tendances acquises, produits de l'éducation et de l'expérience, et des tendances « naturelles », plus constitutive de l'architecture mécanique et neurologique des systèmes. On peut poser l'hypothèse que dans les tâches de coordination, les tendances naturelles du système constituent un déterminant essentiel dans le comportement du débutant. Par contre, concernant les tâches de contrôle, la part des tendances acquises est évidemment plus conséquente.

L'identification des tendances spontanées de coordination semble donc nécessaire pour comprendre le comportement de sujets novices. Un certain nombre d'expérimentations ont tenté d'approcher ce problème dans le cadre des tâches de coordination bimanuelles, considérant les segments oscillants en termes de systèmes non-linéaires d'oscillateurs couplés. On peut noter que bien que les systèmes oscillants, dans le contexte du comportement moteur, ont été principalement étudiées au travers des tâches de coordination bimanuelles (e.g. Haken *et al.*, 1985 ; Kelso & Schönner, 1988 ; Zanone et Kelso, 1992 ; Summers *et al.*, 1993 ; Swinnen *et al.*, 1997), ou des tâches cycliques telles que la marche (Bonnard & Pailhous, 1993 ; Clark, Truly & Phillips, 1993), leur pertinence est beaucoup plus large. Schönner (1990) a montré que ces modèles pouvaient également être appliqués à l'étude des mouvements discrets, et, comme l'indiquent Bergé et al. (1988), tout type de comportement, même extrêmement complexes ou chaotique peut être modélisé sous forme d'oscillateurs couplés dans la mesure où les séries temporelles peuvent être analysées en tant que sommes pondérées de composantes oscillatoires (voir, par exemple, Cordier, Dietrich & Pailhous, 1996).

Les expérimentations sur les coordinations bimanuelles ont mis en évidence une forte tendance à la synchronisation des phases et des fréquences. En d'autres termes, les modes préférentiels de coordination, dans ce type de tâche, semblent caractérisés par un verrouillage absolu des fréquences (c'est-à-dire l'adoption de rapports de fréquence de type 1:1), et une stricte synchronisation des points de revirement des oscillateurs couplés.

Le verrouillage des fréquences a été récemment examiné dans une série d'études portant sur la dynamique des coordinations à fréquences multiples, dans le cadre des tâches de tapping bimanuel (Beek, Peper & van Wieringen, 1992 ; Peper, Beek, & van Wieringen, 1991 ; 1995). Durant ces tâches de tapping à fréquences multiples, les deux mains frappent simultanément un support selon des fréquences différentes. Le rythme résultant peut être caractérisé au travers du rapport entre les fréquences adoptées par chacune des deux mains. Ces expériences ont montré que les rapports de fréquence rationnels (c'est-à-dire pouvant être ramenés à des rapports entre deux nombres entiers) définissaient des régions attractives de l'espace des états. De plus, les rapports de faible ordre (c'est-à-dire les rapports avec des dénominateurs et numérateurs les plus faibles) sont réalisés avec moins de variabilité temporelle que les rapports d'ordre élevé. La difficulté de réalisation des rapports d'ordre élevé (par exemple 8:3 ou 8:5) s'accroît encore lorsque la fréquence du tapping augmente. Les

auteurs ont observé que lorsqu'un rapport donné ne pouvait plus être réalisé de manière consistante, une transition vers un rapport d'ordre plus faible apparaissait. La modélisation de ces systèmes au travers des *sine circle maps* a permis de prédire dans la plupart des cas les chemins de transition vers les rapports de faible ordre (Beek *et al.*, 1992 ; Peper *et al.*, 1995). Ces résultats suggèrent que les rapports rationnels de faible ordre sont les plus susceptibles de capturer les comportements de débutants. À terme, les rapports les plus simples, et notamment le rapport 1:1 peuvent être considérés comme l'attracteur le plus puissant pour les novices.

La tendance à la synchronisation absolue des oscillateurs a été décrite dans un ensemble de travaux récents. Dans une série d'expérimentations sur les coordinations bimanuelles, Swinnen et ses collaborateurs ont demandé à leurs sujets de produire de manière simultanée avec les deux avant-bras des mouvements de fréquences différentes (Swinnen *et al.*, 1991 ; Swinnen, Walter & Shapiro, 1988; Walter & Swinnen, 1990). Plus précisément, la tâche demandait de réaliser une coordination caractérisée par un rapport de fréquence 1:3, l'un des avant-bras réalisant trois oscillations durant une seule oscillation de l'autre. Lors de la réalisation correcte de cette coordination, l'avant-bras rapide présente un point de revirement lorsque l'avant-bras lent parvient au milieu de son déplacement. Le comportement typique du débutant était en fait de produire des mouvements similaires avec les deux segments : on assistait notamment, au niveau du segment le plus lent, à l'apparition de pauses, ou de mini-revirements, reproduisant en réduction le mouvement de l'avant-bras le plus rapide. C'est bien une tendance à la synchronisation absolue qui s'exprimait, attirant le système vers un rapport de fréquence 1:1. Cette tendance constitue un biais systématique, qui doit être dépassé pendant l'apprentissage pour réaliser avec succès la coordination requise (Walter & Swinnen, 1994).

Cette tendance à adopter des rapports de fréquence 1:1 a été également observée dans des tâches plus complexes. Par exemple, dans ses travaux sur le simulateur de ski, Vereijken (1991) a observé l'adoption, chez les débutants, de rapports de fréquence 1:1 entre les mouvements de l'appareil et les oscillations du centre de gravité corporel. Dans des tâches simultanées de marche et de frappes de mains, il a été montré que la plupart des sujets adoptaient spontanément une coordination absolue, avec une frappe par pas (Muzii, Lamm Warburg & Gentile, 1984 ; Whitall & Getchell, 1996. Kelso et Jeka (1992; expérimentation 3) montrent que des sujets adoptent spontanément des rapports 1:1 dans des tâches de coordination entre membres inférieur et supérieur, et surtout à haute fréquence.

Une seconde caractéristique des coordinations spontanées est la synchronisation des points de revirement. Cette tendance conduit, notamment pour les tâches de coordination isofréquencées, à une préférence pour les coordinations en phase et en anti-phase (Haken *et al.* , 1985). Dans ces deux modes de coordination, les mouvements des deux oscillateurs sont initiés et terminés de manière simultanée. En contraste, la réalisation d'un décalage de phase de 90° entre les deux oscillateurs est difficile et demande de l'effort et de la pratique (Zanone & Kelso, 1992). Selon Swinnen *et al.* (1996b), 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.

Ces patterns préférentiels de coordination sont conçus comme intrinsèques au système neuromusculaire, dans la mesure où ils tendent à apparaître spontanément, sans évidente influence extérieure ou intention particulière de la part des sujets (Kelso & Schöner, 1988). Comme le notent Kelso et Jeka (1992, p. 666), « la tendance à la synchronisation des phases et des fréquences est générale dans les systèmes naturels et artificiels, représentant une forme fondamentale d'auto-organisation ».

L'objectif de l'expérimentation décrite ici était de vérifier si ces principes généraux étaient susceptibles de prédire les modes initiaux de coordination adoptés lors de la pratique d'une tâche gymnique complexe. Nous avons choisi d'analyser l'apprentissage des balancers en suspension mi-renversée aux barres parallèles (Figure 1-1). Le but assigné aux sujets était d'apprendre à maintenir et amplifier les balancers.

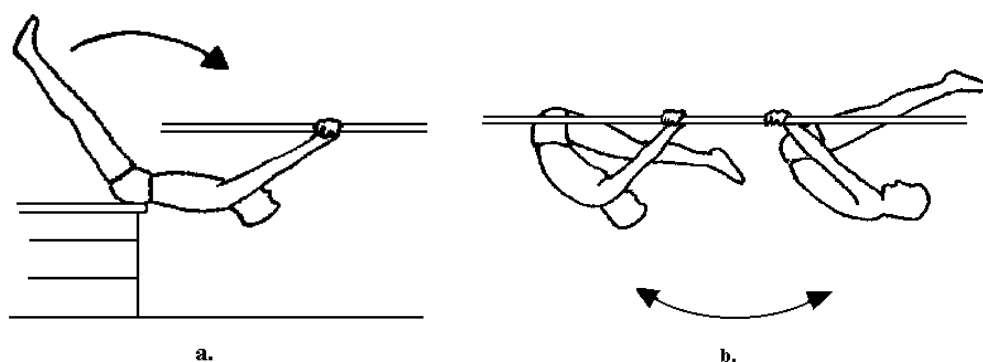


Figure 1-1: Tâche expérimentale (a.: position de départ; b. balancers en suspension mi-renversée).

Cette habileté assujettit largement le sujet à l'exercice de la pesanteur. Le système doit vaincre cette force en générant de l'énergie cinétique. Ce sont les lois biomécanique et la nature des articulations, des segments et des muscles qui vont contraindre le système à choisir une solution particulière.

Biomécaniquement, nous savons que lorsque nous sommes en présence d'un point fixe de rotation (comme les mains tenant les barres parallèles), les points distaux évoluent de façon plus éloignée et plus rapide que les points proximaux. De même, lorsque la force pour mettre le système en mouvement est appliquée près de l'axe et que la résistance est distribuée autour de l'axe, le système a besoin d'une force plus importante que la résistance de la pesanteur et du poids du sujet (dans notre cas). Il faut savoir que même pour un problème de force légère il est nécessaire de développer une force importante. Il faut parvenir à des solutions efficaces qui comprennent l'addition de forces internes pour transférer les moments, une réduction des radii de rotation afin d'augmenter la vitesse angulaire, une réduction du poids de la résistance et une stabilisation des structures par lesquelles ont génère des forces. Pour notre tâche, où les résistances à vaincre sont très importantes, le système doit simultanément, recruter des forces musculaires, parvenir à un bon timing dans la stabilisation des liens entre les segments pour transférer les forces et doit présenter une structure assez « ferme » pour absorber les forces réactives (Higgins,1984). Ce bref exposé d'une infime part des contraintes qui pèse sur le système nous renseigne sur la richesse et la complexité organisationnelle pour parvenir à l'habileté requise.

Le choix de cette tâche a été motivé par le fait que le comportement optimal, du point de vue de l'exploitation des forces passives de l'environnement, semble fortement contrarier, tant du point de vue de la synchronisation des phases qu'à celui des fréquences, les principes généraux précédemment évoqués en ce qui concerne les coordinations spontanées. Cette tâche peut être modélisée, au niveau macroscopique, comme un système de deux oscillateurs couplés (Figure 1-2) : Le premier renvoie aux oscillations pendulaires du centre de gravité du corps autour des mains, et le second aux oscillations verticales du centre de gravité au-dessus de la ligne d'épaules (principalement déterminées par les mouvements d'ouverture/fermeture de l'articulation de la hanche). Dans la mesure où les étapes ultimes de l'apprentissage semblent caractérisées par l'exploitation maximale des forces passives du système, et une optimisation de l'efficacité (Bernstein, 1967; Sparrow, 1983), il est possible de prédire la nature de la coordination experte dans cette tâche.

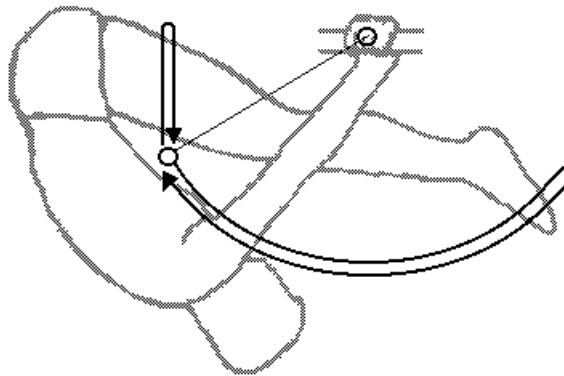


Figure 1-2: Représentation schématique du mouvement pendulaire du centre de gravité et des oscillations verticales du centre de gravité au dessus des épaules.

Quelques conventions terminologiques sont ici nécessaires à introduire. Un cycle complet présente deux points de revirement, vers l'arrière et vers l'avant (définis en référence à l'orientation du corps). Nous appellerons le balancer arrière le déplacement pendulaire allant du point de revirement avant au point de revirement arrière et de manière symétrique le balancer avant correspondra au déplacement pendulaire allant du point de revirement arrière au point de revirement avant. Un cycle complet comprend donc un balancer arrière et un balancer avant. Chaque balancer se compose d'une phase descendante (entre le point de revirement et le passage en verticale basse de l'axe de l'axe de rotation), durant laquelle la gravité exerce un poids moteur et d'une phase ascendante durant laquelle le travail de la gravité est résistant. L'entretien et l'amplification des balancers ne peut en aucun cas venir d'un renforcement externe (comme la poussée pour une balançoire). Ce n'est qu'en modulant au cours de phases spécifiques son moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation que le gymnaste pourra agir sur la dynamique de son mouvement. L'hypothèse peut être faite que le sujet expert exploitera de façon optimale la gravité durant la phase descendante en augmentant la distance du centre de gravité à de 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. Ceci pourrait être réalisé par une ouverture et une fermeture du corps qui constituerait une oscillation verticale du centre de gravité qui viendrait se greffer à l'oscillation pendulaire. La figure 1-3 rend compte de la trajectoire hypothétique du centre de gravité chez l'expert, telle que la prédit l'analyse précédente (voir Smith, 1991). Ce type de trajectoire a déjà été étudié en mathématiques appliqués au travers de l'étude de l'encensoir de Saint Jacques de Compostelle (Bergé,

Pomeau & Dubois-Gance, 1994). Pour entretenir le balancement de l'encensoir, il est nécessaire de faire varier la longueur de la corde à laquelle est suspendu l'encensoir. Pour se faire, les sept officiants, chargés d'entretenir le balancement, ne font que, par l'intermédiaire de cordes nouée à un câble central, raccourcir la corde quand l'encensoir est en position basse et relâcher la corde quand il est au plus haut de sa course. Le rôle des officiants est de créer de l'énergie cinétique mais aussi de ne pas en perdre. Ainsi en raccourcissant la corde en position basse, position où la force centrifuge et la vitesses sont à leur valeur maximales, les officiants produisent un travail contre cette force et apporte donc de l'énergie au système qui est transformé en énergie cinétique. Par contre en relâchant la corde en position haute, il n'y a pas de perte d'énergie par le système car la vitesse et la force centrifuge, sont alors pratiquement nulles. Nous n'irons pas jusqu'à comparer nos experts à des encensoirs... mais leur tâche d'oscillation aux barres parallèles ressemble en de nombreux aspects aux balancements de l'encensoir, hormis, la force exercée qui est pour l'expert, de type auto entretenu et pour l'encensoir de type entretenu par une force extérieure.

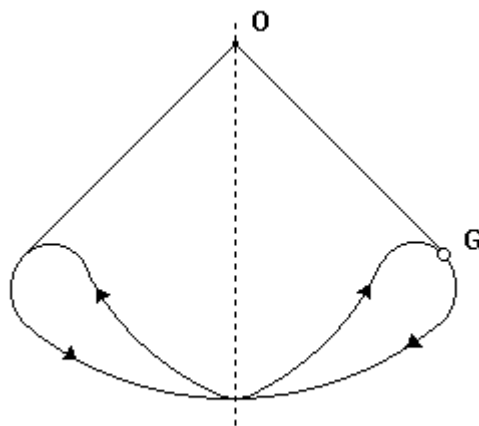


Figure 1-3: Trajectoire idéale du centre de gravité, pour une solution optimale de la tâche expérimentale.

Bergé et al.. (1994) précise à ce propos, qu'étant donné le fait que l'encensoir passe deux fois par période en position basse et haute, la fréquence de stimulation la plus appropriée se trouve être la fréquence double de celle de l'encensoir lui-même (c'est à dire un rapport de fréquence de 2:1). Ceci s'explique par le fait que, dans ce cas présent nous sommes en présence d'une instabilité dite «paramétrique» (car on fait varier de façon périodique l'un des paramètres du système, en l'occurrence la longueur de la corde donc le bras oscillant); pour ce cas d'instabilité c'est le rapport de fréquence de stimulation de 2 :1 qui est la plus efficiente.

L'analyse mécanique de la tâche elle-même et d'un système simplifié s'en approchant (l'encensoir de Saint Jacques de Compostelle), suggèrent donc que le pattern le plus efficace pourrait être caractérisé par un rapport de fréquence de 2:1 avec un décalage de phase de 90° et 270° entre les deux oscillateurs. Ce mode de coordination viole l'ensemble des principes précédemment évoqués. L'adoption de ce pattern suppose une désynchronisation des points de revirement, et le rapport de fréquence, bien que rationnel et de faible ordre, ne constitue pas le plus simple envisageable. Nous faisons l'hypothèse que le comportement des sujets débutants sera caractérisé par un mode de coordination plus simple, n'impliquant qu'un rapport de fréquence de 1:1 et une synchronisation absolue des points de revirement des deux oscillateurs.

1-2- Méthode

1-2-1- Sujets

Huit sujets, quatre femmes et quatre hommes, ont participé volontairement à cette expérience. Ils sont âgés en moyenne de 23,6 ans (écart type: 2,4), possèdent un poids moyen de 68.6 kg (s.d. :11.85) et une taille moyenne de 174.31 cm (s.d. :9.24). Ils font partie de la Faculté des Sciences du Sport de Montpellier et possèdent un passé sportif de niveau moyen à international dans des spécialités sportives très hétérogènes. Cependant, ils n'ont jamais eu d'expérience significative aux agrès en gymnastique.

Quatre sujets de sexe masculin, experts en gymnastique (10 ans de pratique minimum à niveau régional) ont également pris part à l'expérimentation. Ils étaient âgés de 21.7 ans (s.d. :1.3). Tous les sujets ont signé un formulaire de consentement et n'ont reçu aucune rémunération pour leur participation.

1-2-2- La tâche

La tâche a été réalisée sur des barres parallèles, réglées à une hauteur de 130cm et espacées de 50 cm. Les sujets partaient en position allongée sur un plinth (d'une hauteur de 1m) placé entre les barres. Dans cette position, leurs mains étaient placées en pronation sur les barres (Figure xx a.). Ils devaient ensuite ramener leurs membres inférieurs au-dessus de leur poitrine jusqu'à ce que le bassin glisse vers l'arrière du plinth: ce mouvement leur permettait de se mettre en position mi-renversée et d'initier les balancers. Il était demandé aux sujets de

réaliser six balancers successifs. Le but assigné était d'entretenir puis de chercher à amplifier ces balancers (Figure 1-1.). Les mains étaient enveloppées par des bandes médicales collantes élastiques pour protéger la paume des mains des ampoules.

1-2-3- Le protocole

La tâche a été réalisée par les sujets novices durant dix sessions de pratique à raison de trois fois par semaine, toujours à la même heure de la journée pour chaque sujet. En début de session les sujets observaient sur vidéo-cassette une démonstration des balancers, réalisée par un sujet expert. Aucune indication verbale quant à la manière de procéder n'était donnée. Seule l'exécution et le but de la tâche étaient présentés : « maintenir et amplifier les balancers ». Le visionnage de la cassette a été fait au début de chaque session. Les sujets avaient la possibilité de visionner cette cassette autant de fois qu'il leur semblait nécessaire.

Chaque session était composée de 10 essais, avec deux minutes de repos entre chaque essais. Les sujets devaient exécuter quatre cycles complets de balancers pour que l'essai soit considéré comme valide. L'enregistrement des données étaient déclenché à l'issue du premier cycle de balancer.

Les sujets étaient équipés de 9 marqueurs réfléchissants, situés aux emplacements suivants sur le côté droit du corps (voir Figure 1-4):

Marqueur	n° 1 : troisième métacarpien - 2e phalange
	n° 2 : styloïde cubitale
	n° 3 : tête humérale
	n° 4 : canal auditif
	n° 5 : jonction entre la dorsale n° 12 et la première lombaire
	n° 6 : grand trochanter
	n° 7 : genou
	n° 8 : ½ tibia
	n° 9 : malléole externe

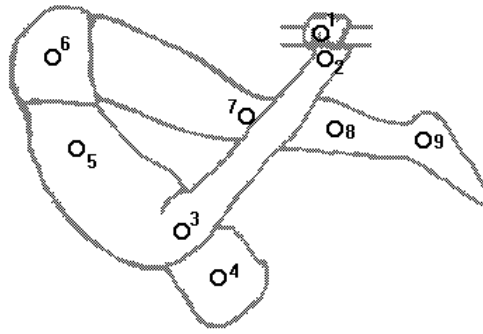


Figure 1-4: Emplacement des 9 marqueurs réfléchissants pour l'analyse d'image.

La position de ces marqueurs était signalée sur la peau au feutre indélébile, afin d'assurer un repositionnement précis au fil des sessions. Les paramètres cinématiques de la trajectoire des neuf marqueurs ont été enregistrés par un système *Elite Analyser Motion* (BTS), à une fréquence de 100 Hz. Ce dispositif d'analyse d'image était composé de 2 caméras orientées vers le centre et le bas de la pièce d'expérimentation. Les données ont été recueillies aux essais suivants (Tableau 1-1).

Tableau 1-1: Essais avec acquisition pour les 10 jours d'apprentissage

Jours	Essais avec acquisition
1	1;2;3;4;5;6;7;8;9;10
2	1;2;3;4;5;6;7;8;9;10
3	2;4;6;8;10
4	2;6;9;10
5	2;6;9;10
6	5;9;10
7	5;9;10
8	5;9;10
9	5;9;10
10	5;9;10

Nous avons réduit le nombre d'acquisition de données au fur et à mesure des sessions, en référence avec l'étude de Vereijken (1991) qui précise que les principaux changements qualitatifs de la coordination se font dès les premières séances d'apprentissage. Il nous a donc

paru pertinent de recueillir les données de chaque essai pour les deux premières séances et de réduire progressivement les acquisitions jusqu'à 3 par séance (pour les 5 derniers jours). Ces multiples acquisitions et notamment l'évolution essai après essai lors des premiers jours, ne seront cependant pas traitées dans cette présentation.

Les sujets experts n'ont pour leur part réalisé qu'une seule session de trois essais. Leur prestation lors de ces trois essais a été enregistrée selon les mêmes modalités que les sujets novices.

1-1-4- Analyse des données

Les coordonnées des marqueurs sont traitées en deux dimensions, selon le plan sagittal des sujets. Ces coordonnées ont été dans un premier temps réétablies en prenant pour origine la position instantanée du marqueur n°1. Nous avons donc ignoré dans la suite du traitement les mouvements des barres.

Les données ont été lissées par une moyenne mobile à 5 points. Les coordonnées du centre de gravité ont été calculées par la méthode de Winter (1990), basées sur des rapports standards entre poids corporel total et poids des différents segments d'une part, et entre position des centres de masse segmentaires et longueurs des segments d'autre part. La détermination des coordonnées du centre de gravité global a été réalisée selon les étapes suivantes, répétées pour les coordonnées x et y :

➤ le centre de gravité du dos correspondant au centre de gravité entre D12/L1 et l'oreille (cdg dos):

$$x \text{ cdg dos} = x \text{ D12/L1} + (0,614) * (x \text{ oreille} - x \text{ D12/L1}).$$

➤ le centre de gravité entre la jambe et le pied (cdg J)

$$x \text{ cdg J} = x \text{ genou} + (0,606) * (x \text{ pied} - x \text{ genou})$$

➤ le centre de gravité de la cuisse (cdg C)

$$x \text{ cdg C} = x \text{ hanche} + (0,430) * (x \text{ genou} - x \text{ hanche})$$

➤ le centre de gravité du membre inférieur (cdg MI)

$$xcdgMI = \frac{(0.601 * xcdgJ) + (0.1 * ycdgC)}{0.161}$$

➤ le centre de gravité du membre supérieur (cdg MS)

$$x\ cdg\ MS = x\ \text{épaule} + (0.530) * (x\ \text{poignet} - x\ \text{épaule})$$

➤ le centre de gravité entre le pelvis et l'abdomen (cdg A)

$$x\ cdg\ A = x\ dos + (0.27) * (x\ hanche - x\ dos)$$

➤ le centre de gravité entre le tronc et la tête (cdg Tr)

$$xcdgTr = \frac{(0.281) * xcdgA + (0.297) * xcdgdos}{(0.578)}$$

➤ le centre de gravité général (cdg):

$$x\ cdg = (0,578 * x\ cdg\ Tr) + (0.1 * x\ cdg\ MS) + (0,322 * x\ cdg\ MI)$$

Pour ces différents calculs, les positions des membres opposés étaient considérées comme symétriques. Par la suite une série de variables dépendantes ont été dérivées.

L'amplitude des oscillations pendulaires du centre de gravité :

Cette amplitude constitue un indicateur important de l'efficacité du pattern de coordination. On a calculé, sous forme de série temporelle, l'angle défini par la droite main (marqueur n°1)-centre de gravité et la verticale (angle β , Figure 1-5). Comme β suivait approximativement une fonction sinus du temps, l'amplitude moyenne (a) a été directement estimée à partir de l'écart type de β suivant cette formule :

$$a = \sigma_{\beta} \sqrt{2}$$

sachant que

$$\sigma_{\beta} = \sqrt{\frac{\sum (a \sin \omega t - 0)^2}{N}} = a \sqrt{\frac{\sum \sin^2 \omega t}{N}} = a \sqrt{1/2}$$

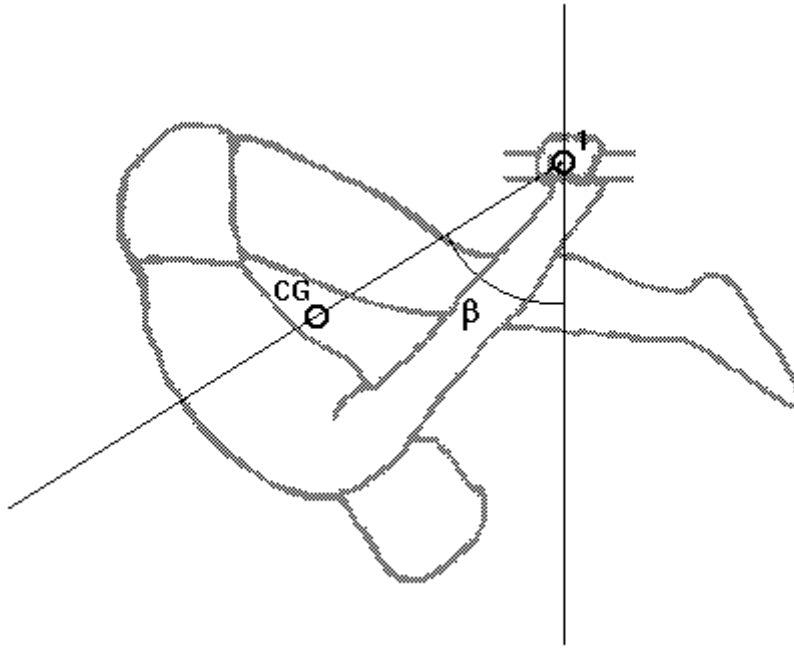


Figure 1-5: Angle β

La variabilité des angles de l'épaule et de la hanche

La variabilité des angles de l'épaule et de la hanche ont été calculées dans le but d'analyser la participation de ces articulations corporelles principales dans la coordination. L'angle de l'épaule (α_1) est défini par l'angle entre le membre supérieur (marqueur n°2–marqueur n°3) et le tronc (marqueur n°6-centre de gravité du tronc). L'angle de la hanche (α_2) est défini par l'angle entre le membre inférieur (marqueur n°6-centre de gravité du membre inférieur) et le tronc (marqueur n°6-centre de gravité du tronc)(Figure 1-6).

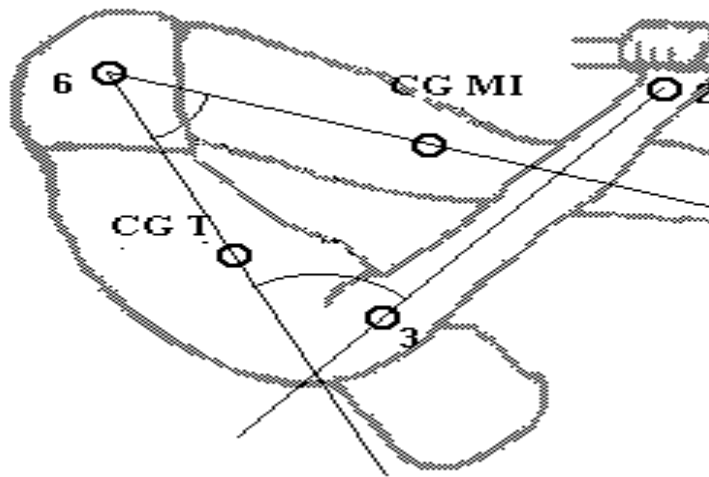


Figure 1-6: Angles α_1 et α_2 .

La phase relative et le rapport de fréquence

Pour le calcul de la phase relative, nous avons tout d'abord établi les séries temporelles de la distance d entre le centre de gravité et la ligne des épaules (marqueur n°3) et l'angle β . d et β ont été lissés par une moyenne mobile à cinq points et converti en phase :

$$\phi_{\beta} = \arctg(\dot{\beta}/\beta) \quad \text{et} \quad \phi_d = \arctg(\dot{d}/d)$$

d et β et leurs dérivés respectives ayant été auparavant standardisé à l'intérieur de chaque cycle. Selon les conventions de calcul de la phase, les valeurs 0 et 180° de ϕ_{β} correspondent respectivement aux points de revirement avant et arrière, et les valeurs 90° et 270° aux passages vers l'arrière et vers l'avant au point d'équilibre stable. La valeur 0 de ϕ_d correspond à la flexion maximale du corps et la valeur 180° à l'extension maximale.

La période (**P**) de β a été déterminée au moyen d'une fonction d'auto-corrélation de β . **P** correspond pour chaque essai au décalage auquel la fonction d'auto-corrélation atteint son premier maximum (Vereijken, 1991). Le décalage (ϕ) entre ϕ_{β} et ϕ_d , au moment de l'initiation de l'oscillation verticale ($\phi_d = 0$) est estimé par l'analyse de la fonction de cross-corrélation entre ϕ_{β} et ϕ_d . Cette analyse nous a permis de déterminer le(s) décalage(s) correspondant au(x) maxima de cross-corrélation. θ en (en degrés) a alors été calculé selon la formule suivante :

$$\phi=360*(Mx/P)$$

Enfin le rapport de fréquence entre les deux oscillateurs a été déterminé par le nombre de maxima observés pour une période P de l'oscillation pendulaire. Toutes ces variables dépendantes ont été moyennées par sessions et sujets et analysée par ANOVA à un facteur (session) avec mesures répétées. Des ANOVAs supplémentaires ont été réalisées pour comparer les novices (valeurs obtenues lors de la dernière session) et les experts.

1-3-Résultats

Nous n'avons pas pu considérer la totalité du protocole en raison des blessures aux mains occasionnées par la tâche (ampoules dans la paume des mains). Certains sujets n'ont pas pu participer aux 10 sessions et nous n'avons donc retenu que les 8 premières sessions réalisées par la totalité des sujets. Peu d'essais invalides ont été observés, et pour la plupart au cours de la deuxième session. Tous nos sujets à l'exception d'un seul (sujet E.R.) ont été capables d'exécuter au moins quatre balancers dès le premier essai. Le sujet E.R a satisfait cette exigence à partir de la troisième session.

1-3-1- Amplitude des oscillations pendulaires

Concernant les experts, l'amplitude moyenne était pour leurs trois essais de 67.08° (sd = 5.23). Pour les novices, nous avons constaté une augmentation graduelle de l'amplitude de 23.55° (s.d. = 4.63) pour la première session à 47.06° (s.d = 12.87) pour la huitième session. L'analyse de la variance a montré un effet significatif de la pratique ($F_{7,49}=29.08$, $p<0.001$) avec des tendances linéaire et quadratique significatives (respectivement $F_{1,7}=41.32$, $p<0.001$ et $F_{1,7}=8.16$, $p<0.05$), suggérant une accélération négative de l'amélioration en amplitude. Les tests post-hoc révèlent que les contrastes adjacents ne sont significatifs qu'entre les trois premières sessions. L'inspection de la Figure 1-7 montre qu'un de nos novices (H.B.) est particulièrement performant. Ce sujet a été exclu lors d'une seconde analyse de variance, mais un effet similaire de la pratique a été obtenu pour les 7 sujets restants ($F_{7,42}= 54.29$, $p<0.001$) avec des tendances linéaire et quadratique équivalentes (respectivement $F_{1,6} = 338.05$, $p<0.001$ et $F_{1,6} = 6.80$, $p<0.05$). En dépit des progrès obtenus par les novices au terme des huit sessions, ils n'ont pas atteint les valeurs observées chez les experts ($F_{1,10} = 8.61$, $p<.02$).

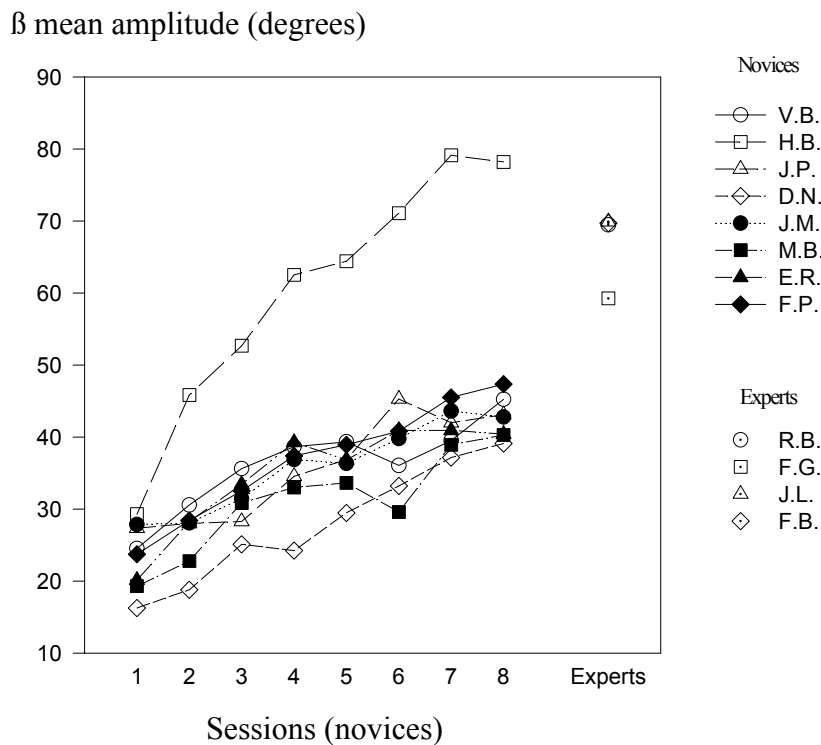


Figure 1-7: Evolution de l'amplitude moyenne des balanciers, en fonction des sessions de pratique chez les novices, et valeurs moyennes observées chez les experts.

1-3-2- Variabilité des angles de l'épaule et de la hanche.

Il n'y a pas d'effet de la pratique pour l'angle de l'épaule ($F_{7,49}=1.96$, $p>.05$). Ceci indique qu'il n'y a pas d'évolution de la mobilisation de l'épaule durant les huit sessions. Il n'y a pas non plus de différence dans la variabilité de l'angle de l'épaule entre les novices, à la dernière session de pratique, et les experts (18.37 degrés vs 17.91 degrés; $F_{1,10}=0.02$, $p>.05$; voir Figure 1-8, graphique de gauche).

En ce qui concerne la variabilité de l'angle de la hanche, on obtient un effet significatif de la pratique ($F_{7,49} = 6.50$, $p<0.001$) avec une tendance linéaire significative ($F_{1,7}=16.77$, $p<0.01$). Les tests post hoc indiquent que l'augmentation de la variabilité de l'angle de la hanche est significative à partir de la troisième session. Ceci indique que la mobilisation de la hanche augmente avec la pratique. En outre, il n'y a pas de différence significative entre les novices, lors de la dernière session de pratique, et les experts (20.23° vs 14.63° ; $F_{1,10} = 1.32$, $p>0.05$; voir Figure 1-8, graphique de droite).

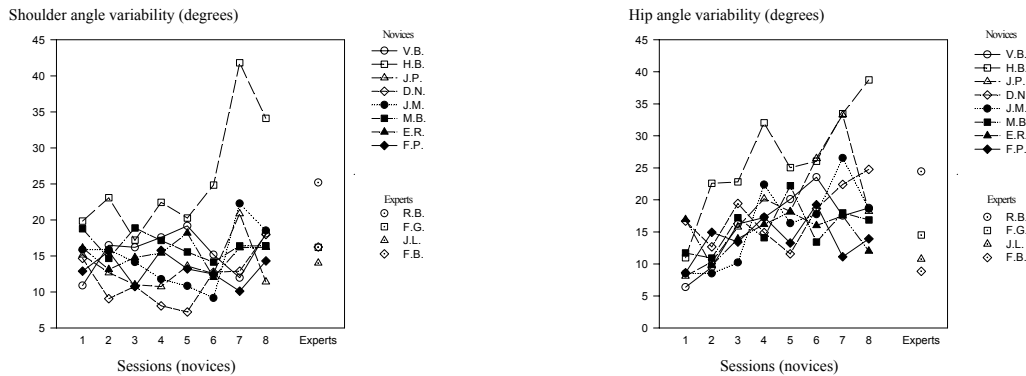


Figure 1-8 : Evolution de la variabilité de l'angle de l'épaule (à gauche), et de l'angle de la hanche (à droite), pour les novices en fonction des sessions de pratique, et pour les experts.

1-3-3- Rapport de fréquence et phase relative

Pour chaque essai réalisé par les experts deux maximaux de cross-corrélation ont été obtenus pour une période P. Ceci indique un rapport de fréquence de 2 :1 entre les oscillations pendulaire et verticale du centre de gravité. Les phases relatives moyennes correspondant à ces deux maxima sont respectivement de 83.50° (s.d : 6.09°) pour le premier et 283.71° (s.d : 8.68°) pour le second (ou -76.28°). Ce qui signifie que la première oscillation verticale est initiée juste avant le passage au point d'équilibre stable pour le balancer vers l'arrière (avec un décalage négatif de 6.50°) et une seconde oscillation est initiée après la position d'équilibre stable durant le balancer vers l'avant(avec un décalage positif de 13.7°). Plus clairement, les oscillations verticales du centre de gravité sont initiées au voisinage des points d'équilibre des oscillations verticales à la fois pour le balancer vers l'avant et l'arrière. (Figure 1-9).

Pour l'ensemble des essais réalisés par les novices, un seul maximum de cross-corrélation a été obtenu par période P. Le rapport de fréquence entre les deux oscillateurs est donc de 1:1. La phase relative lors de l'initiation de l'oscillation pendulaire était en moyenne de -4.55° (sd= 16.42), indiquant que l'oscillation verticale est initiée près du point de revirement avant de l'oscillation pendulaire. L'ANOVA n'indique aucun effet de la pratique sur la phase relative ($F_{7,49}=1.70, p>0.05$; Figure 1-9).

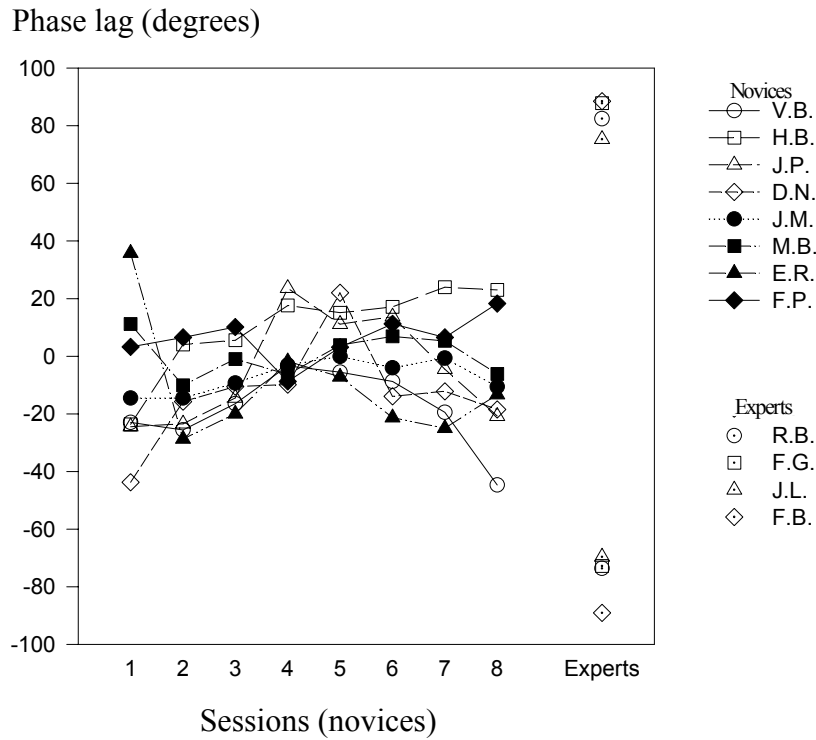


Figure 1-9: Evolution de la phase relative chez les novices, en fonction des sessions de pratique, et valeurs observées chez les experts.

La figure 1-10 illustre deux trajectoires typiques du centre de gravité, pour un novice et pour un expert. Les deux oscillations verticales, symétriquement placées autour de la position d'équilibre des balanciers, sont aisément identifiables chez l'expert. Par contre, la trajectoire des novices indique une stricte synchronisation entre les deux oscillateurs.

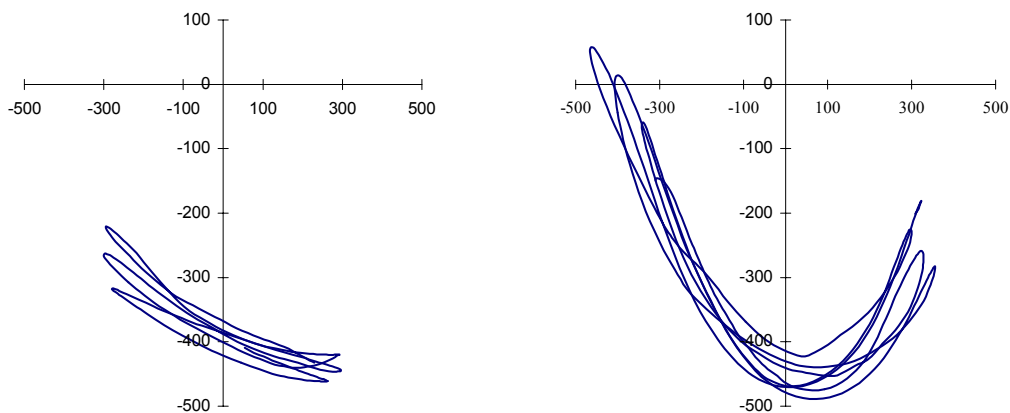


Figure 1-10: Trajectoires typiques du centre de gravité, dans le plan sagittal, pour un novice (à gauche, sujet F.P., session 8, essai 10) et pour un expert (à droite, sujet R.B., essai

2). Les données de position sont référées au marqueur numéro 1 (unité de mesure: 1mm). Le point de revirement avant est situé sur la droite des figures.

Nous avons étudié tout particulièrement les données de notre «meilleur» novice (sujet H.B.). Ce sujet a réalisé neuf sessions de pratique. Il a débuté avec une amplitude moyenne de 29.29° pour atteindre à la dernière session une amplitude de 73.38° . Les analyses révèlent, tout au long de l'expérimentation, un rapport de fréquence de 1:1, identique aux observations réalisées chez l'ensemble des novices. Néanmoins, on observe une augmentation graduelle de la phase relative à l'initiation de l'oscillation verticale. Si au début de l'expérimentation, la valeur de phase relative moyenne est de -23° , elle atteint à l'issue de l'expérimentation une valeur de 37° . Ce sujet tend donc à initier l'oscillation verticale du centre de gravité vers le milieu de la partie descendante de l'oscillation pendulaire vers l'arrière. Au contraire, les autres sujets restent tous centrés autour d'une phase relative de 0° (Figure 1-11).

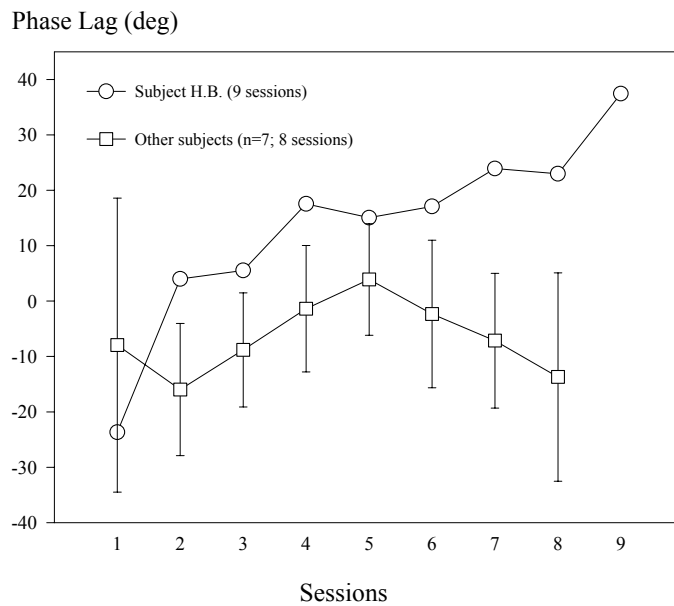


Figure 1-11 : Evolution de la phase relative, pour notre meilleur novice (sujet H.B.), et pour les sept autres sujets. Le sujet H.B. a réalisé 9 sessions complètes. Les données ont été moyennées sur les 8 premières sessions pour les autres sujets.

1-4-Discussion

Cette étude s'est attachée à l'analyse du comportement du novice confronté à une nouvelle tâche, en comparaison avec le comportement de l'expert. Notre intention était d'analyser plus particulièrement le mode de coordination du novice durant les premiers essais d'acquisition d'une habileté complexe incluant la participation de la totalité des segments

corporels. Le nombre d'essais était trop restreint pour espérer observer l'acquisition du comportement expert. Notre objectif était donc davantage focalisé sur la caractérisation du comportement du débutant, que sur son éventuelle évolution.

Tout d'abord nos résultats montrent une amélioration de la performance durant les huit sessions de pratique. L'ensemble des sujets est parvenu à «maintenir et amplifier les balancers» même si nos sujets n'ont pas atteint les valeurs d'amplitude des experts. Nous n'avons pas observé d'évolution marquante du mode de coordination en terme de transition de phase entre deux modes de coordination qualitativement différentes, mais une optimisation du mode initialement adopté.

L'accroissement de l'amplitude observée au cours de l'expérimentation contraste en effet avec la stabilité du mode de coordination, en termes de phase relative et de rapport de fréquences. Durant toute l'expérimentation, les novices ont exploité le même pattern, caractérisé par une synchronisation absolue des phases et des fréquences. Dans la mesure où ce pattern a été adopté par l'ensemble des sujets, au cours des 8 sessions de pratique, on peut le considérer comme un attracteur intrinsèque du système, semblant fortement contraindre le comportement des débutants.

La stabilité de cette coordination et en particulier de la phase relative, est en contradiction avec les résultats de Vereijken (1991), qui observait chez les débutants sur le simulateur de ski des valeurs de phase relative instables, et une progressive convergence, avec la pratique, vers une phase relative reproductible. Vereijken note que lors des premiers essais le forçage peut apparaître à n'importe quel moment dans le cycle. Ce n'est clairement pas le cas dans notre expérimentation, et au-delà d'une variabilité minime, intra- et inter-sujets, l'initiation des oscillations verticales tend à s'opérer de façon constante au voisinage du point de revirement avant du balancer (Figure 1-9).

Cette contradiction avec les résultats de Vereijken (1991) peut provenir de la nature de notre tâche, qui pourrait contraindre davantage la coordination. On peut également noter que tous nos sujets sont parvenus dès les premiers essais à maintenir la position renversée. Ceci peut être lié au fait que nos sujets étaient tous sportifs de bon niveau dans d'autres disciplines. On peut supposer que des sujets sédentaires présenteraient des phases relatives moins stables, associées à de grandes difficultés à maintenir la position renversée.

Le pattern produit par les experts est en adéquation avec nos prédictions. Ce pattern permet d'exploiter au maximum la gravité durant la partie descendante du balancer et de diminuer les résistances dues au poids durant la partie ascendante, en réduisant la trajectoire du centre de gravité. Ce résultat conforte les idées selon lesquelles la coordination de l'expert est caractérisée par l'efficacité et une exploitation maximale des forces passives du système (Bernstein, 1967 ; Kamon & Gormley, 1968 ; Sparrow, 1983 ; Vereijken, 1991). Selon Higgins (1984), un aspect important de l'habileté motrice renvoie à la capacité à coordonner de manière complémentaire les forces actives et passives.

La coordination typique des novices est clairement moins efficace. Le travail mécanique de la gravité n'est pas exploité et les sujets forcent le système tout au long de l'oscillation pendulaire. Mais ce pattern semble être pour ces sujets le plus aisé à contrôler. La synchronisation des points de revirement des deux oscillateurs et plus spécifiquement la synchronisation de l'initiation de l'oscillation verticale avec le début du balancer en arrière, représente un point d'ancrage qui permet un contrôle de la coordination.

Ainsi le problème de l'apprentissage semble résider dans le dépassement de ces modes de coordination spontanés pour atteindre des solutions permettant d'exploiter de façon plus efficace les forces passives du système. Ce que nous avons relevé dans cette expérimentation nous semble intéressant dans la compréhension du problème de l'apprentissage en sport et en éducation physique. En effet jusqu'à présent, avec les théories cognitivistes, le comportement du débutant a été considéré avant tout comme une représentation erronée de la tâche (voir par exemple Piard, 1993, ou Giordan, 1993). Lors des premières étapes de l'apprentissage, le sujet tente d'adapter son P.M.G. aux exigences de la tâche et il est donc logique que le comportement soit alors incorrect, peu ajusté.

Mais on peut jeter un regard différent sur le comportement moteur des novices. Loin de refléter une inadaptation à la tâche, il pourrait constituer la meilleure solution au problème posé par les contraintes du système à ce moment donné. Ainsi le problème de l'éducation serait moins de guider le système vers le pattern qu'il doit apprendre que de l'aider à quitter son mode de coordination initial et à trouver une solution optimale (Durand, 1992a, 1992b). Ce type de perspective a été évoqué par Swinnen et Walter (1992), dans leur travail sur *l'adaptive tuning*: Le principe sur lequel les auteurs travaillaient consistait à faciliter l'apprentissage, en réduisant la force de l'attracteur initial du système. Plus spécifiquement, ces auteurs ont montré qu'en agissant de manière spécifique sur un paramètre de contrôle

pertinent (la fréquence d'oscillation dans une tâche bimanuelle), on pouvait réduire la force des attracteurs spontanés du système (notamment le rapport de fréquence 1:1), pour permettre l'acquisition d'un nouveau mode de coordination (dans l'expérimentation citée, un rapport de fréquence 2:1). Mais une telle perspective demande l'identification systématique du paramètre de contrôle qui affecte le pouvoir attractif de la coordination initiale. Ceci nous semble soulever un champ de recherche intéressant qui demanderait de plus amples investigations afin de pouvoir valider de telles hypothèses dans le domaine de l'étude des habiletés complexes.

On peut estimer décevant de n'avoir pas enregistré de transition vers le comportement expert. Rappelons cependant que ce dernier ne s'acquiert qu'au terme de longues années de pratique intensive. On doit ajouter à cela que dans cette expérimentation aucun pattern précis n'était a priori demandé aux sujets. Un but de performance leur était donné (maintenir et amplifier les balancers), mais ils devaient découvrir eux-mêmes la coordination la plus appropriée. Le modèle vidéo ne donnait que l'image du mouvement à exécuter mais aucune explication n'était apportée sur la nature exacte de la solution exploitée par le sujet expert. De ce fait les sujets ne tentaient pas d'atteindre ou de reproduire un pattern donné, comme dans les expérimentations de Zanone & Kelso (1992) mais plutôt de s'adapter aux contraintes du système compte tenu de la tâche proposée.

La persistance et la stabilité du mode de coordination initial, même après quatre-vingt essais, montre que les coordinations préférentielles sont très difficiles à dépasser. Même lorsque le pattern à apprendre est clairement spécifié, ce qui n'était pas le cas ici, des aides à l'apprentissage, telles que le feedback augmenté, semblent nécessaire (Swinnen, 1996). Il serait intéressant de voir si la spécification du pattern, ainsi que l'apport d'un feed-back concernant le temps de forçage et le rapport de fréquence, pourraient faciliter la transition vers la coordination experte.

L'analyse des données obtenues pour notre meilleur sujet peut nous permettre de spéculer sur l'évolution de la coordination. Elle suggère que la transition vers un comportement expert est préparée comme une évolution progressive de la coordination, et plus spécialement par l'augmentation de la phase relative entre les deux oscillateurs. Nous avons observé que le meilleur sujet essayait de retarder le forçage jusqu'à la fin de la phase descendante du balancer vers l'arrière. Une telle tendance avait déjà été relevée par Vereijken (1991), sur le simulateur de ski. Ce découplage partiel entre les deux oscillateurs permet la

libération d'une part du balancer afin de pouvoir inclure à terme une seconde oscillation verticale du centre de gravité. Ceci suggère au final une transition graduelle, plutôt qu'abrupte, vers un rapport de fréquence de 2:1. Cependant, cette capacité à découpler les oscillations verticales et les balancers demande un contrôle subtil de la raideur du système, difficilement réalisable par les débutants.

En conclusion, cette expérimentation montre clairement que les tendances spontanées de coordination constituent des éléments déterminant des premiers modes de coordination adoptés par les novices lors de l'apprentissage d'une tâche nouvelle. Pour ce qu'ils ont d'essentiels nos résultats indiquent un comportement typique des débutants, caractérisé par une synchronisation des phases et des fréquences. La primauté, la persistance et la stabilité de ce comportement suggèrent qu'il exprime la dynamique intrinsèque du système. De nombreuses études antérieures, basées sur des tâches bimanuelles ont déjà caractérisé ce concept de dynamique intrinsèque (voir par exemple Zanone & Kelso, 1992). Notre étude l'étend aux tâches sportives complexes tout comme Vereijken (1991) a pu le faire avec son expérimentation sur le simulateur de ski.

Lors de cette étude, nous n'avons pas relevé d'effet de la pratique pour la variable collective de la phase relative. Loin de penser que la pratique n'influence pas l'évolution des coordinations, nous suggérons plutôt que les contraintes de la tâche et la durée de notre protocole, ne nous ont pas permis de constater des changements qualitatifs dus à la pratique. Par contre, Vereijken (1991) a pu relever un effet de la pratique dans l'adoption successive de patterns de coordination qualitativement différents, et ce très tôt. Nous nous proposons de reprendre la tâche entreprise par Vereijken (les oscillations au simulateur de ski) pour étudier l'effet de la pratique, combiné avec l'effet possible de l'amplitude. Des études au sein de notre laboratoire (Durand *et al.* 1994) sur cette même tâche d'oscillations au simulateur de ski, ont relevé une convergence des fréquences d'oscillations individuelles vers une fréquence unique et ce pour une certaine valeur d'amplitude identique à tous les sujets. Les auteurs ont suggérés que la fréquence d'oscillation constituait un facteur déterminant dans la recherche de solutions optimales pour la performance. Nous avons proposé une autre interprétation des résultats, en présumant plutôt l'importance de l'atteinte d'une certaine valeur d'amplitude afin de parvenir à une convergence des fréquences (Delignières, Geoffroi, Nourrit & Durand, 1996) et nous posons à présent une nouvelle question : « L'aménagement des contraintes de la

tâche, en terme de différentes amplitudes requises, permet- elle une plus grande efficacité et
efficience dans l'exécution de la tâche ? »

CHAPITRE II : Les effets de la contrainte en terme d'amplitude sur la stabilité et l'efficience

2-1- Introduction

Dans les conceptions dynamiques du contrôle moteur, la coordination motrice est conçue comme une propriété émergente d'un ensemble complexe de contraintes en interaction (Kugler, Kelso & Turvey, 1980; 1982; Kugler & Turvey, 1987). De ce point de vue, une contrainte est définie comme une réduction des degrés de liberté du système: les contraintes guident ou limitent le comportement, en réduisant les possibilités d'action.

Newell (1986) ces contraintes peuvent être catégorisées, selon qu'elles viennent (1) de l'organisme, (2) de l'environnement, ou (3) de la tâche. Les contraintes liées à l'organisme incluent les caractéristiques physiques du sujet (taille, poids, morphologie,...) et psychologiques ou émotionnelles (Clark, 1995). Parmi les contraintes psychologiques, Chatillon & Baldy (1994) suggèrent que la représentation du but génèrerait une pression qui permettrait l'émergence de la réponse motrice. Steenberger, Marteniuk et Kalbfleisch (1995) considère de même, qu'elles prennent en compte les facteurs de la dynamique intrinsèque telle que la relation de phase. Les contraintes environnementales proviennent de l'environnement physique (la gravité, la température ambiante, la luminosité), et aussi de l'environnement culturel qui tend à promouvoir certains comportements et à en prohiber d'autres (voir par exemple Reed, 1993). Steenberger et al.(1995) précise de plus, que les contraintes environnementales englobent les facteurs que l'on manipule pour déterminer leur influence sur l'émergence du pattern de mouvement. Finalement, les contraintes de la tâche renvoient aux caractéristiques de la tâche à réaliser (instruments, dispositifs...) et aux instructions qui ont été données aux sujets, concernant le but à atteindre et/ou les coordinations particulières à réaliser. Les interactions entre ces trois catégories de contraintes déterminent à la fois les patterns possibles et le pattern optimal pour la tâche. Selon Newell (1986), l'importance relative de ces trois catégories de contraintes sur le pattern varie selon les situations.

Un certain nombre d'études dans le domaine de l'optimisation dans les activités cycliques offrent de bon exemples de tels principes (Sparrow, 1983). Nombre de travaux ont

montré qu'un ensemble donné de contraintes déterminait une solution optimale, en termes de dépense énergétique. Par exemple Hogberg (1952) observe pour une vitesse donnée de course (16 km/h) une courbe à optimum entre longueur de foulée et consommation d'oxygène. Une relation similaire a été mise en évidence par Holt *et al.* (1991), lors de la marche à une vitesse déterminée, entre la fréquence du pas et la consommation d'oxygène. Des résultats similaires ont été décrits dans diverses tâches cycliques par Salvendy (1972). Holt, Hamill & Andres (1991) montrent qu'un modèle basé sur les propriétés mécaniques du corps (les contraintes de l'organisme) permettait de prédire avec précision la fréquence optimale de marche, en tant que fréquence de résonance du pendule simple équivalent aux segments corporels (voir également Kugler & Turvey, 1987). De plus, lorsque les sujets sont libres de choisir leurs patterns de réponse, ils optent systématiquement pour les plus efficaces (Corlett & Mahaveda, 1970; Salvendy, 1972; Warren, 1984 ; Holt *et al.*, 1991).

L'approche dynamique des coordinations motrices met également l'accent sur la stabilité, comme autre caractéristique fondamentale des réponses optimales (Schöner & Kelso, 1988; Kelso, Ding & Schöner, 1993; Kelso, 1995). Dans ce cadre, la dynamique de la coordination est capturée à un niveau abstrait (mathématique) par l'équation de mouvement d'une variable collective, donc la dynamique peut être représentée par une fonction de potentiel, ponctuée d'attracteurs (les points d'équilibre stables du système), et de repellants (les points d'équilibre instables). La stabilité et l'instabilité jouent un rôle crucial dans la dynamique de la variable collective: le système tend à rejoindre les attracteurs du potentiel, et toute modification comportementale (les transitions de phase) est déterminée par une déstabilisation des coordinations antérieures.

On doit noter que la stabilité, dans ce cadre, ne signifie ni rigidité, ni stéréotype. La rigidité peut survenir lorsqu'une habileté est acquise dans un environnement clos et reproductible. Dans ce cas, le sujet peut avoir des difficultés à s'adapter avec des perturbations inattendues. La stabilité, d'un point de vue dynamique, renvoie à la capacité du système à revenir rapidement sur son attracteur après une perturbation. De la sorte, un pattern habile est très stable, mais demeure flexible et adaptable.

Stabilité et efficacité ont rarement été étudiés simultanément. Néanmoins Holt *et al.* (1995) ont fait l'hypothèse selon laquelle, stabilité et efficacité étaient deux caractéristiques fondamentales du comportement optimal, et ont montré que la marche à fréquence préférentielle était caractérisée à la fois par une efficacité maximale et par une variabilité

minimale, au niveau du déplacement de la tête et de la phase relative des charnières articulaires. Candau, Belli, Millet, Georges, Barbier & Rouillon (1998) ont récemment mis en évidence une relation étroite entre efficacité et stabilité de la longueur de la foulée lors de la course.

L'apprentissage moteur, dans ce cadre, est conçu comme la recherche de la solution optimale dans l'espace perceptivo-moteur (Fowler & Turvey, 1978; Newell, Kugler, van Emmerik & McDonald, 1989). Cet espace représente un interface hypothétique entre perception et action, déterminé par les interactions entre l'ensemble des contraintes pesant sur le système. Dans la continuité de la discussion précédente, l'amélioration de l'efficacité et de la stabilité constituent des résultats attendus de l'apprentissage moteur. De telles tendances ont été mises en évidence dans de nombreuses expérimentations, en ce qui concerne l'efficacité (Kamon & Gormley, 1968; Sparrow, 1983; Sparrow & Irizarry-Lopez, 1987; Durand *et al.*, 1994), ou la stabilité (Higgins & Speath, 1972; Hoffman, 1974, Marteniuk & Romanov, 1983; Darling & Cooke, 1987; Zanone & Kelso, 1992).

L'apprentissage émerge d'une interaction complexe entre la pratique et les contraintes. La pratique permet aux sujets de répéter le processus d'exploration, et les contraintes canalisent cette exploration, en réduisant les possibilités d'action. De plus, dans la plupart des tâches écologiquement significatives, l'apprentissage ne peut être conçu comme l'exploration d'un espace de travail statique. La pratique amène une amélioration progressive de l'habileté, qui permet en retour au sujet d'incorporer de nouvelles contraintes. En d'autres termes, l'espace de travail perceptivo-moteur évolue qualitativement avec la pratique, et la découverte d'une première solution permet d'enrichir l'ensemble des contraintes et de relancer le processus d'exploration.

Ces principes sont clairement illustrés dans une expérience d'apprentissage réalisée par Durand *et al.* (1994), sur un simulateur de ski. Cet appareil (voir figure 2-1) consiste en une plate forme, équipée de roulettes, qui peut se déplacer de droite à gauche sur deux rails bombés. Deux bandes élastiques tendent à ramener la plate-forme en position centrale, lorsqu'elle a été amenée préalablement vers la droite ou la gauche. Cet appareil permet aux sujets de réaliser des mouvements rythmiques s'apparentant à un mouvement de godille à ski, et a été utilisé dans de nombreuses expérimentations, principalement dévolues à l'analyse de l'évolution des coordinations motrices et de la performance avec la pratique (e.g. den Brinker, Ståbller, Whiting & van Wieringen, 1986; van Emmerik, den Brinker, Vereijken & Whiting.,

1989; Vereijken et Whiting, 1990 ; Vereijken, 1991; Vereijken, van Emmerick, Bongaardt, Beek & Newell, 1997 ; Vereijken, van Emmerick, Whiting & Newell, 1992a; Vereijken, Whiting & Beek, 1992b; Whiting & Vereijken, 1993 ; Whiting, Vogt & Vereijken, 1992).



Figure 2-1: Le simulateur de ski (voir le texte pour les détails). D'après Whiting et al. (1992)

Dans leur expérience, Durand *et al.* (1994) analysent chez 5 sujets l'évolution de l'amplitude et de la fréquence durant 6 sessions de pratique. Ils observent une graduelle convergence des fréquences autour d'une valeur moyenne de 1.1 Hz¹ (Figure 2-2, graphique de gauche). Durant la première session de grandes différences interindividuelles sont observées (de 0.7 à 1.3 Hz). De plus un accroissement significatif de l'efficacité était constaté au fur et à mesure des sessions.

¹ Le calcul de la fréquence, dans le travail de Durand *et al.* (1994), était basé sur la durée d'un demi-cycle (d'un point de revirement au point de revirement opposé). Les auteurs rapportent donc une convergence des fréquences autour d'une valeur moyenne de 2.2 Hz. Cette valeur doit être divisée par deux pour correspondre avec les mesures plus courantes de la fréquence, basées sur la durée complète du cycle.

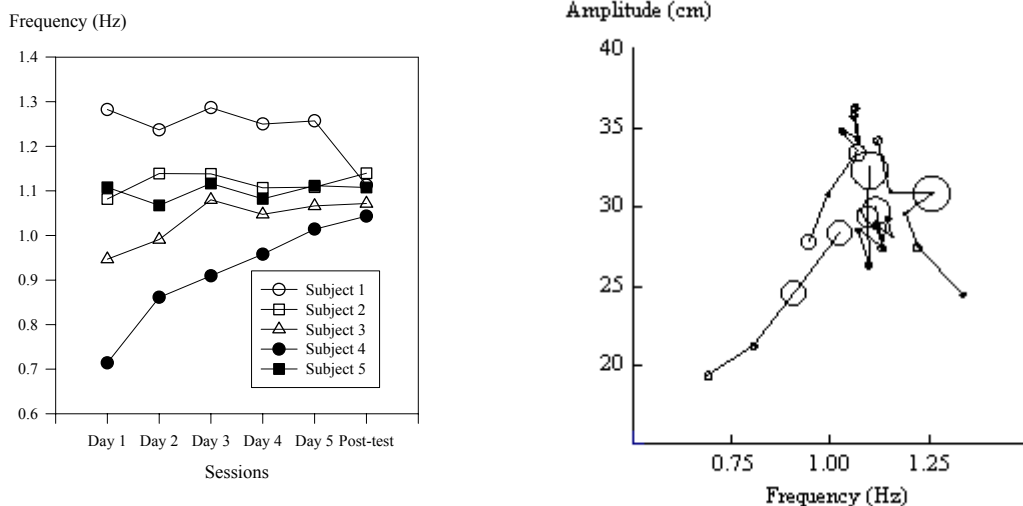


Figure 2-2. A gauche: Evolution de la fréquence, au niveau individuel, au cours de cinq sessions de pratique et d'un post-test sur le simulateur de ski (d'après Durand et al., 1994). A droite: Représentation de l'évolution de la relation entre amplitude et fréquence, durant la même expérimentation. Les données ont été soumises à analyse par clusters. Chaque cluster est représenté par une bulle, dont le diamètre est proportionnel au nombre de points successifs inclus dans le cluster. Les données des 5 sujets ont été superposées dans le graphique. Cette figure illustre la convergence des fréquences, au-delà d'une amplitude de 30 cm (d'après Geoffroi, Delignières & Durand, 1995).

Ces résultats sont consistants avec les hypothèses précédentes: les sujets tendent avec la pratique à adopter une fréquence proche de la fréquence de résonance du système, débouchant en un accroissement progressif de l'efficacité. Cette progressive convergence des fréquences est cohérente avec les conceptions de l'apprentissage comme recherche de solutions optimales dans un espace de travail (Newell *et al.*, 1989).

Delignières *et al.* (1996) ont suggéré une interprétation alternative, suite à une analyse en profondeur des données de Durand *et al.* (1994). Ils montrent que la convergence des fréquences, autour d'une valeur de 1.1 Hz, tend à apparaître au-delà d'un seuil d'amplitude approximativement égal à 30 cm. Certains présentent au début de l'expérience une fréquence très élevée ou à l'inverse très lente, associées à de très faibles amplitudes. Ils ne rejoignent pas la fréquence optimale avant d'avoir été capable d'atteindre une amplitude proche de 30 cm. D'autres sont capables dès le début de l'expérience d'atteindre une amplitude de 30 cm. Ceux-là adoptent dès les premiers essais une fréquence proche de 1.1 Hz. Ces observations sont

illustrées sur la figure 2-2 (graphique de droite), qui représente l'évolution de la relation entre amplitude et fréquence, pour les 5 sujets impliqués dans l'expérience.

Ces observations suggèrent que l'augmentation de l'amplitude peut être considérée comme générant un ensemble de contraintes contraignant les degrés de liberté du système, et entraînant les sujets vers l'adoption de la fréquence de résonance. De ce point de vue, la convergence des fréquences est principalement due à l'accroissement de l'amplitude, progressivement permise par la pratique.

L'expérience de Durand *et al.* (1994) ne permet pas de distinguer les effets de l'amplitude et de la pratique, dans la mesure où les gains en amplitude sont le résultat de la pratique. Nous avons tenté dans l'expérience présente de d'analyser les effets de l'amplitude et de la pratique, manipulés comme facteurs indépendants. L'amplitude est imposée par une valeur cible imposée à chaque groupe expérimental, et la pratique vise à optimiser le comportement, à cette amplitude déterminée.

Les effets de ces deux acteurs sont analysés en termes d'efficacité et de stabilité comportementale (au travers de la variabilité de la fréquence). Un effet principal des deux facteurs est attendu, dans la mesure où (a) la pratique est conçue comme une recherche de solutions stables et énergétiquement optimales, et (b) l'amplitude est supposée moduler la disponibilité de ces solutions optimales dans l'espace de travail. Des effets d'interaction sont également attendus, qui pourraient révéler un possible accroissement des effets de la pratique au moyen d'exigences spécifiques en termes d'amplitude. Clairement, on suppose que la pratique à grande amplitude est plus efficace, en termes d'efficacité et de stabilité.

2-2- Méthode

2-2-1- Sujets

Quinze participants (âge moyen: 23.8 ans \pm 2.3, poids moyen: 71.0 kg \pm 6.5 , taille moyenne: 176.5 cm \pm 6.8) se sont portés volontaires pour cette expérimentation. Tous étaient des skieurs occasionnels, mais aucun n'avait d'expérience antérieure sur le simulateur de ski. Ces sujets ont signé un formulaire de consentement, et n'étaient pas payés pour leur participation.

2-2-2-Dispositif

La tâche a été réalisée sur un simulateur de ski de marque Skier's Edge. Les pieds des sujets étaient fixés à la plate-forme du simulateur. 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 plate-forme à partir de la position centrale suite à l'application d'une force tangentielle de 100 Newtons.

2-2-3- Procédure

Les sujets ont été aléatoirement répartis en trois groupes expérimentaux. Il leur a été demandé de réaliser des mouvements de type slalom sur l'appareil, avec une amplitude de 15 cm (groupe 1), 22.5 cm (groupe 2) ou 30 cm (groupe 3). Deux baguettes en fibre de verre étaient fixées verticalement de part et d'autre du dispositif, et matérialisait pour chaque groupe l'amplitude à atteindre. Il faut noter que l'amplitude maximale possible sur le simulateur est d'environ 50 cm. Le choix de ces amplitudes modérées était motivé par trois considérations:

(1) Chaque sujet devait bénéficier de la même quantité de pratique à son amplitude cible. Aussi était-il nécessaire que l'amplitude requise puisse être atteinte dès les premiers essais de l'expérimentation.

(2) Les résultats de Durand *et al.* (1994) suggéraient qu'une amplitude de 30 cm était suffisante pour obtenir une convergence et une stabilisation des fréquences.

(3) Ces amplitudes cibles étaient suffisamment faibles pour éviter une usure prématurée des bandes de caoutchouc.

Afin de nous assurer que tous les sujets parviendraient à l'exécution de l'amplitude cible dès la première session, nous avons procédé à une session de familiarisation.

Quatre sessions de pratique ont été réalisées sur quatre jours consécutifs. Chaque session était composée de quatre essais de quatre minutes, séparés par un repos de quatre minutes. Les sujets pratiquaient individuellement. Aucune démonstration ne leur était proposée, mais il leur était demandé de réaliser des oscillations régulières à leur amplitude cible, et d'adopter la fréquence la plus confortable.

Dans la mesure où nous nous attendions à ce que la pratique à forte amplitude soit la plus bénéfique en terme d'apprentissage, des tests de transfert ont été proposés aux sujets du

groupe 3. A la fin de leur dernière session, ces sujets ont réalisé deux tests de transferts de quatre minutes, respectivement à 15 et 22.5 cm. L'ordre de passation de ces deux tests a été randomisé entre les sujets, et un repos de quatre minutes était proposé entre les deux tests. L'objectif de ces tests était de permettre une analyse des effets d'une diminution de l'amplitude, chez des sujets ayant pratiqué à grande amplitude, et de comparer ces sujets, à amplitudes similaires, avec les sujets ayant pratiqué aux amplitudes moyenne et faible.

2-2-4- Variables dépendantes

La position du centre de la plate-forme 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 pour la plate-forme. Les données ont été stockées sur un ordinateur personnel pour les traitements subséquents.

Les données de position ont tout d'abord été filtrées selon une Transformée Rapide de Fourier (F.F.T.). Un algorithme de recherche de pic a été utilisé pour localiser les points de revirement du mouvement. L'amplitude des oscillations (en cm) était définie comme la moyenne des déviations maximales de la plate-forme, de part et d'autre de la position centrale. L'amplitude moyenne a été calculée par intervalles de 30 secondes, soit huit mesures successives pour chaque essai de quatre minutes. La fréquence (en Hz) était définie comme l'inverse de la durée d'un cycle complet. La fréquence moyenne a été calculée également par intervalles de 30 secondes.

La variabilité intra-individuelle de la fréquence était mesurée par l'écart-type de la fréquence, et calculée pour chaque intervalle de 30 secondes. La variabilité inter-individuelle de la fréquence était définie comme l'écart-type, à l'intérieur de chaque groupe, de l'échantillon des fréquences moyennes, et a été calculée pour chaque intervalle de 30 secondes.

Deux évaluations distinctes de l'efficacité énergétique ont été réalisées et basées sur (1) la dynamique de la plate-forme, et (2) des données physiologiques. Un indice d'harmonie a été calculé, défini comme le coefficient de corrélation ($r_{x, \ddot{x}}$) entre la position (x) et sa dérivée seconde. Selon Guiard (1993), un système masse-ressort idéal, exploitant parfaitement les forces réactives, devrait tendre vers un mouvement harmonique simple. Dans le cas d'une harmonie complète, x est une fonction sinus du temps, et $r_{x, \ddot{x}}$ doit être égal à 1

(la dérivée seconde d'une fonction sinus étant également une fonction sinus). $r_{\dot{x}, \ddot{x}}$ a été calculé pour chaque intervalle de 30 secondes, et une transformation de Fischer a été appliquée avant les tests statistiques.

La consommation d'oxygène a été mesurée en continu par un appareil Cosmed K2, un système portable télémétrique qui mesure le $\dot{V}E$ (volume d'air expiré en litres par minutes), et le $\dot{V}O_2$ (volume d'oxygène consommé en litres par minutes). Les sujets étaient équipés d'un masque, connecté à une unité d'analyse et de transmission (poids: 400g) et fixé au niveau de la ceinture. Les données étaient envoyées par télémétrie à une unité de réception et stockées pour les analyses ultérieures. Ces données ont été moyennées par le système pour chaque intervalle de 30 secondes.

L'efficacité physiologique a été évaluée par le calcul du coût du mouvement, définie comme le rapport $\dot{V}O_2 / (\text{amplitude} \times \text{fréquence})$ (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 du mouvement est donc calculé pour chaque intervalle de trente secondes des deux dernières minutes de chaque essai.

2-2-5- Analyses statistiques

En ce qui concerne les données des sessions de pratique, l'amplitude, la fréquence, la variabilité intra-individuelle et l'harmonicité ont été analysés par une ANOVA à quatre facteurs, Groupe (3) X Session (4) X Essai (4) X Intervalle (8), avec mesures répétées sur les trois derniers facteurs. La variabilité inter-individuelle a été analysée par une ANOVA à trois facteurs, Groupe (3) X Session (4) X Trial (4), avec mesures répétées sur les deux derniers facteurs. Pour cette analyse, les valeurs d'intervalles sont considérées comme des cas. Le coût du mouvement a été analysé par une ANOVA à quatre facteurs, Groupe (3) X Session (4) X Essai (4) X Intervalle (4).

Les essais de transfert (conditions "15 cm" et "22.5 cm") ont été comparés avec le dernier essai réalisé par le groupe 3 dans la condition "30 cm", par une ANOVA à un facteur (Condition), et trois niveaux de mesure répétée. Puis deux ANOVA à un facteur ont été réalisées pour comparer les groupes 3 et 2 (en prenant en considération d'une part les données du groupe 3 à "22.5 cm", et les données du dernier essai réalisé par le groupe 2), et les

groupes 3 et 1 (en prenant en considération d'une part les données du groupe 3 à "15 cm", et les données du dernier essai réalisé par le groupe 1). En raison de problèmes techniques dans le stockage des données, les mesures de $\dot{V}O_2$ n'étaient pas disponibles pour ces tests de transfert. Les analyses ont donc été réalisées uniquement sur l'amplitude, la fréquence, les variabilités intra- et inter-individuelles, et l'harmonicité.

Afin de se prémunir contre de possibles violations des hypothèses de sphéricité et de symétrie complexe, la significativité des rapports F a été ajustée selon la procédure de Huyn-Felt.

2-3- Résultats

Les résultats sont présentés en deux sections: la première concerne les sessions de pratique, et la seconde les essais de transfert.

2-3-1- Sessions de pratique

Amplitude. Un effet principal du facteur Groupe est obtenu ($F_{2,12}=63.38$, $p<.001$). Les valeurs moyennes sont égales à 16.96 cm (SD=2.95) pour le groupe 1, 25.46 cm (SD=2.15) pour le groupe 2, et 32.54 cm (SD=1.32) pour le groupe 3. Les tests post-hoc indiquent que chaque moyenne diffère significativement des deux autres. Aucun effet n'est obtenu pour les facteurs Session et Essai. L'interaction Essai X Groupe est significative ($F_{6,36}=3.42$, $p<.05$), avec une tendance linéaire significative ($F_{2,12}=3.91$, $p<.05$). Cet effet indique qu'à l'intérieur de chaque session, l'amplitude tend à croître légèrement pour le groupe 3, et à décroître de manière symétrique pour le groupe 1.

Fréquence. L'analyse révèle un effet significatif du facteur Groupe ($F_{2,12}=8.68$, $p<.01$). Les valeurs moyennes sont égales à 1.18 Hz (SD=0.14) pour le groupe 1, 0.84 Hz (SD=0.15) pour le groupe 2, et 0.94 Hz (SD=0.08) pour le groupe 3. Les tests post-hoc indiquent que la fréquence est plus élevée pour le groupe 1 que pour les deux autres groupes. Den Brinken, Stäbler & Vergeer (1984) ayant montré une relation linéaire significative entre le poids des sujets et la fréquence préférentielle, une analyse de la covariance contrôlant le poids a été réalisée. L'effet Groupe subsiste dans cette analyse de covariance ($F_{2,11}=8.52$, $p<.01$).

Il n'y a pas d'effet Session, mais un effet Essai significatif ($F_{3,36}=19.44$, $p<.001$) avec une tendance linéaire significative ($F_{1,12}=24.92$, $p<.001$): à l'intérieur de chaque session, la fréquence moyenne tend à augmenter du premier au dernier essai. Un effet principal a également été obtenu pour le facteur Intervalle ($F_{7,84}=4.04$, $p<.05$), avec une tendance quadratique significative ($F_{1,12}=4.98$, $p<.05$): d'une manière générale, la fréquence tend à diminuer durant les quatre premiers intervalles de chaque essai, puis à demeurer stable jusqu'à la fin de l'essai.

Variabilité intra-individuelle de la fréquence. On obtient un effet Groupe significatif ($F_{2,12}=9.97$, $p<.01$). Les valeurs moyennes sont de 0.033 Hz (SD=0.017) pour le groupe 1, 0.021 Hz (SD=0.005) pour le groupe 2, et 0.023 Hz (SD=0.009) pour le groupe 3. Les tests post-hoc indiquent que la variabilité est plus élevée pour le groupe 1 que pour les autres groupes (Figure 2-3). La variabilité intra-individuelle de la fréquence semble donc plus élevée lorsque les sujets pratiquent à faible amplitude.

On obtient un effet Session significatif ($F_{3,36}=3.72$, $p<.05$), avec une tendance linéaire significative ($F_{1,12}=4.95$, $p<.05$), indiquant que la variabilité de la fréquence tend à décroître de manière linéaire de la première à la dernière session. Enfin, un effet significatif du facteur Intervalle est obtenu ($F_{7,84}=6.77$, $p<.001$), avec des tendances linéaires et quadratiques significatives ($F_{1,12}=8.13$, $p<.05$, et $F_{1,12}=14.24$, $p<.01$, respectivement): à l'intérieur de chaque essai, la variabilité de la fréquence est plus élevée durant la première minute que pendant les intervalles suivants.

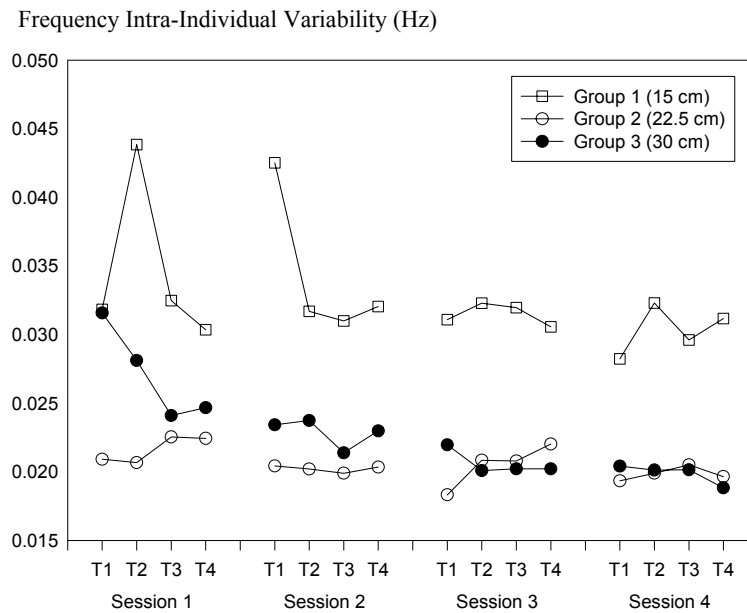


Figure 2-3: Evolution de la variabilité intra-individuelle de la fréquence, pour les trois groupes expérimentaux, au cours des quatre sessions de pratique.

Variabilité inter-individuelle de la fréquence. Un effet principal du facteur Groupe est obtenu ($F_{2,21}=399.33$, $p<.001$). les valeurs moyennes sont égales à 0.151 Hz ($SD=0.019$) pour le groupe 1, 0.166 Hz ($SD=0.020$) pour le groupe 2, et 0.078 Hz ($SD=0.027$) pour le groupe 3. Les tests post-hoc indiquent que le groupe 3 (grande amplitude) présente une plus faible variabilité inter-individuelle que les groupes 1 et 2 (Figure 2-4). Un effet Session est également présent ($F_{3,63}=56.37$, $p<.001$), avec une tendance cubique significative ($F_{1,21}=157.61$, $p<.001$), indiquant que la variabilité inter-individuelle augmente de la première à la seconde session, puis décroît jusqu'à la fin de l'expérimentation. On obtient également un effet Essai ($F_{3,63}=89.33$, $p<.001$), avec une tendance linéaire ($F_{1,21}=160.22$, $p<.001$), indiquant à l'intérieur de chaque session, la variabilité inter-individuelle croît linéairement du premier essai au dernier.

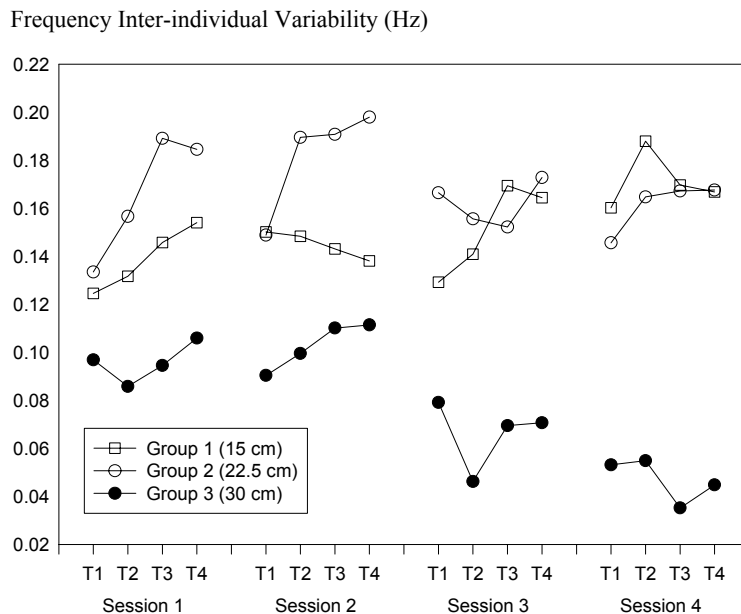


Figure 2-4: Evolution de la variabilité inter-individuelle de la fréquence, pour les trois groupes expérimentaux, au cours des quatre sessions de pratique.

L'interaction Groupe X Session est significative ($F_{6,63}=119.07$, $p<.001$), avec une tendance linéaire significative ($F_{2,21}=161.48$, $p<.001$). Les tests post-hoc indiquent que les différences entre le groupe 3 et les deux autres groupes ne sont significatives qu'à partir de la troisième session. Il y a également une interaction Session X Trial ($F_{9,189}=19.37$, $p<.001$), avec une tendance linéaire significative ($F_{1,21}=70.10$, $p<.001$). Les tests post-hoc montrent que l'accroissement de la variabilité de la fréquence est plus importante durant les deux premières sessions que durant les deux dernières.

Coût du mouvement. Aucun effet Groupe n'est obtenu, mais un effet Session significatif ($F_{3,36}=3.46$, $p<.05$), avec une tendance linéaire significative ($F_{1,12}=4.65$, $p<.05$): le coût du mouvement décroît linéairement de la première session à la dernière (0.71, 0.70, 0.65 et 0.63 ml.kg.s⁻¹, respectivement). On obtient également un effet Essai ($F_{3,36}=5.92$, $p<.01$), avec une tendance linéaire ($F_{1,12}=10.43$, $p<.01$): le coût du mouvement décroît linéairement du premier essai au dernier, à l'intérieur de chaque session (0.69, 0.68, 0.67 et 0.66 ml.kg.s⁻¹, respectivement). L'interaction Session X Essai est significative ($F_{9,108}=2.25$, $p<.05$), avec une tendance linéaire significative ($F_{1,12}=4.72$, $p<.05$): la diminution du coût du

mouvement, à l'intérieur de chaque session, est davantage marquée au début de l'expérimentation qu'à la fin (Figure 2-5).

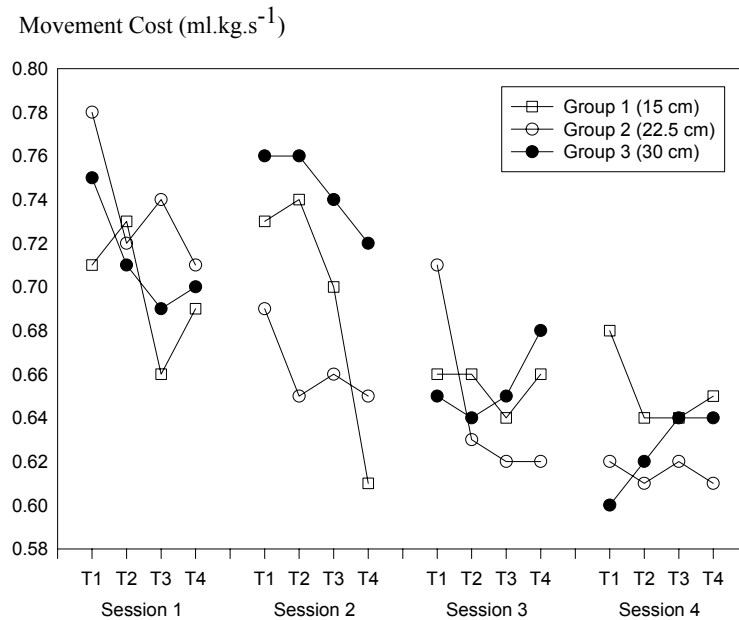


Figure 2-5: Evolution du coût du mouvement, pour les trois groupes expérimentaux, au cours des quatre sessions de pratique.

Harmonicité. On n'obtient pas d'effet Groupe ($F_{2,12}=3.42$, $p=.067$), mais un effet Session significatif ($F_{3,36}=12.15$, $p<.001$), avec des tendances linéaire et quadratique significatives ($F_{1,12}=15.46$, $p<.01$, et $F_{1,12}=15.26$, $p<.01$, respectivement): l'harmonicité croît de manière significative de la première à la seconde session, puis demeure inchangée jusqu'à la fin de l'expérimentation. Le $Zr_{x, \bar{x}}$ moyen pour les quatre sessions est égal à -1.87, -2.00, -2.03 et -2.02, respectivement. On a également un effet Essai ($F_{3,36}=24.64$, $p<.001$), avec des tendances linéaire et quadratique ($F_{1,12}=33.30$, $p<.001$, et $F_{1,12}=13.89$, $p<.01$, respectivement). L'harmonicité croît de manière significative du premier au second essai de chaque session, puis demeure inchangée jusqu'à la fin de la session (Figure 2-6). Le $Zr_{x, \bar{x}}$ moyen pour les quatre essais est égal à -1.88, -1.99, -2.02 et -2.05, respectivement. Enfin, l'interaction Session X Essai est significative ($F_{9,108}=4.551$, $p<.001$), avec une tendance linéaire ($F_{1,12}=25.382$, $p<.001$), indiquant que l'accroissement de l'harmonicité est plus important lors de la première session que pendant les suivantes.

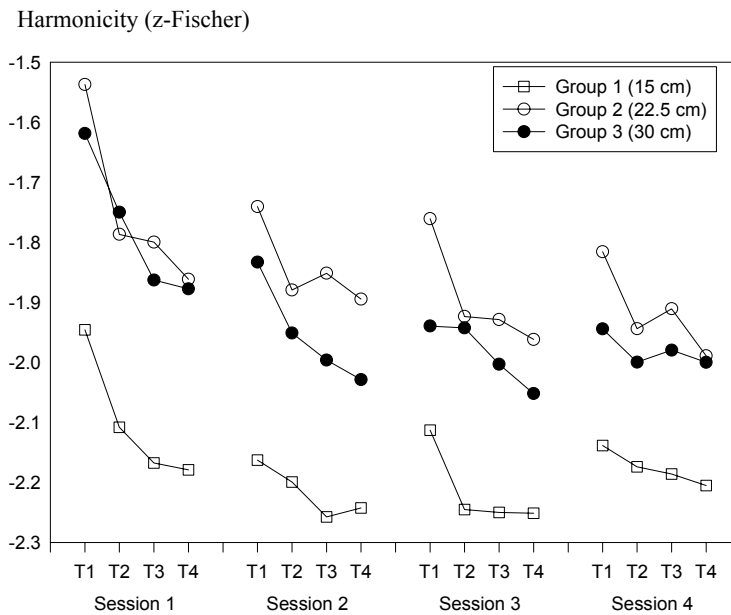
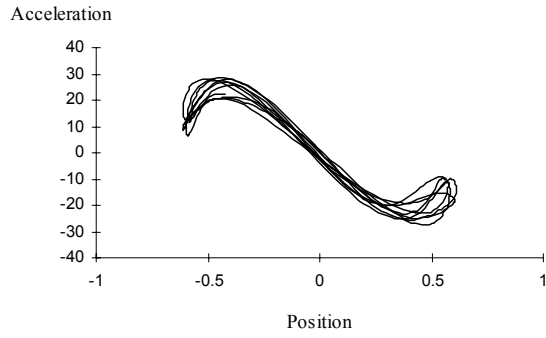
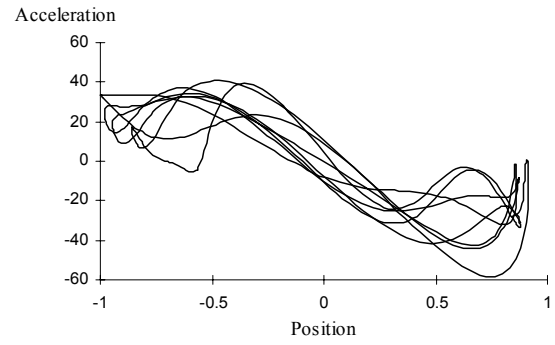


Figure 2-6: Evolution de l'harmonicité, pour les trois groupes expérimentaux, au cours des quatre sessions de pratique.

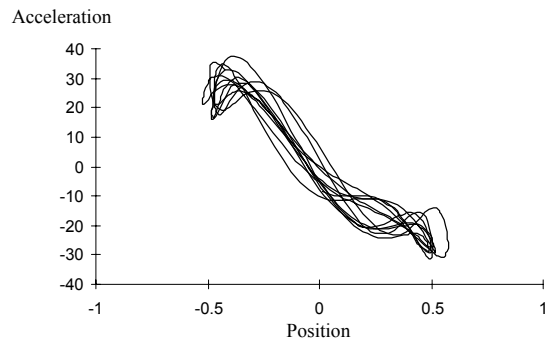
La figure 2-7 illustre l'évolution des portraits de Hooke au cours de l'expérience, pour deux sujets représentatifs des groupes 1 et 3. L'accélération est représentée contre la position. Au début de l'expérimentation, ces portraits montrent une pause systématique dans l'accélération aux extrémités de chaque oscillation. A la fin de l'expérience, une relation linéaire est obtenue.



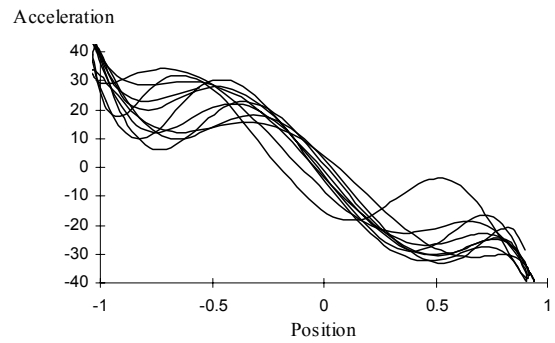
Session 1 - Trial 1 ($r_x, \ddot{x} = -0.902$)



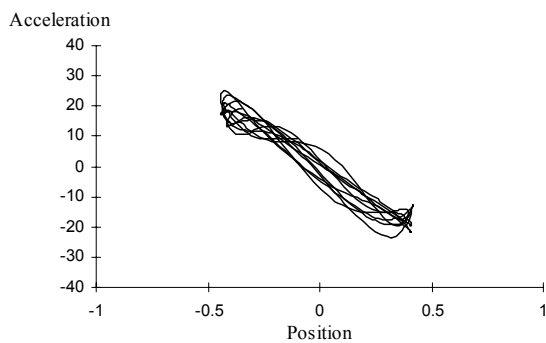
Session 1 - Trial 1 ($r_x, \ddot{x} = -0.856$)



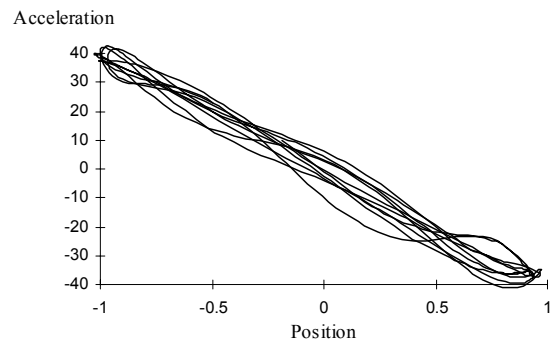
Session 1 - Trial 4 ($r_x, \ddot{x} = -0.949$)



Session 1 - Trial 4 ($r_x, \ddot{x} = -0.969$)



Session 4 - Trial 4 ($r_x, \ddot{x} = -0.971$)



Session 4 - Trial 4 ($r_x, \ddot{x} = -0.988$)

Figure 2-7: Evolution des portraits de Hooke, du début à la fin de l'expérimentation, pour deux sujets représentatifs (à droite, sujet P.M., groupe 1; à droite, sujet L.J., groupe 3).

2-3-2- Tests de transfert.

Amplitude. L'analyse intra-sujet indique un effet Amplitude cible significatif ($F_{2,8}=324.25$, $p<.001$), avec une tendance linéaire ($F_{1,4}=388.87$, $p<.001$). Les valeurs moyennes obtenues sont de 32.30 cm (SD= 0.70) pour la condition "30 cm", 25.72 cm (SD=1.72) pour la condition "22.5 cm", et 16.59 cm (SD=1.87) pour la condition "15 cm". Les tests post-hoc indiquent que chaque moyenne diffère des deux autres. Un effet Intervalle est également obtenu ($F_{7,28}=5.77$, $p<.001$), avec des tendances linéaire et quadratique ($F_{1,4}=13.74$, $p<.05$, et $F_{1,4}=11.185$, $p<.05$, respectivement): quelle que soit l'amplitude cible, l'amplitude moyenne tend à décroître linéairement durant les trois premiers intervalles puis demeure constante jusqu'à la fin de l'essai. Les analyses inter-sujets ne révèlent aucun effet, simple ou d'interaction, pour la comparaison des groupes 3 et 2, de même que pour les comparaisons des groupes 3 et 1.

Fréquence. L'analyse intra-sujet ne révèle aucun effet simple ni d'interaction. De même, les analyses inter-sujets ne révèlent aucun effet, pour la comparaison des groupes 3 et 2, de même que pour les comparaisons des groupes 3 et 1.

Variabilité intra-individuelle de la fréquence. L'analyse intra-sujet indique un effet Amplitude cible ($F_{2,8}=7.38$, $p<.05$), avec une tendance linéaire ($F_{1,4}=13.36$, $p<.05$). Les valeurs moyennes sont égales à 0.019 Hz (SD=0.005) pour la condition "30 cm", 0.024 Hz (SD=0.013) pour la condition "22.5 cm", et 0.035 Hz (SD=0.016) pour la condition "15 cm". Les comparaisons post-hoc montrent que chaque moyenne diffère des deux autres. La variabilité intra-individuelle croît lorsque l'amplitude cible décroît. Il n'y a pas d'effet Intervalle, et pas d'interaction. Enfin aucun effet simple ou d'interaction n'est révélé par les deux analyses inter-sujets, indiquant que la variabilité intra-individuelle n'est pas significativement différente entre groupes, à amplitudes cible équivalentes.

Variabilité inter-individuelle de la fréquence. L'analyse intra-sujets révèle un effet Amplitude cible ($F_{2,14}=241.77$, $p<.001$). Les tendances linéaire et quadratique sont significatives ($F_{1,7}=253,75$, $p<.001$; $F_{1,7}=102,12$, $p<.001$, respectivement). Les valeurs moyennes sont 0.045 Hz (SD=0.008) pour la condition "30 cm", 0.121 Hz (SD=0.034) pour la condition "22.5 cm", et 0.271 Hz (SD=0.046) pour la condition "15 cm". Les comparaisons

post-hoc indiquent que chaque moyenne diffère des deux autres: la réduction de l'amplitude entraîne un accroissement systématique de la variabilité inter-individuelle de la fréquence.

La comparaison entre les groupes 2 et 3 (pour une amplitude cible de 22.5 cm) indique une différence significative ($F_{1,14}=8.54$, $p<.05$): la variabilité inter-individuelle est plus importante pour le groupe 3 que pour le groupe 2 (0.166 vs 0.134). Une différence significative est également mise en évidence lors de la comparaison entre les groupes 1 et 3 (pour une amplitude cible de 15 cm: $F_{1,14}=39.67$, $p<.001$): la variabilité inter-individuelle est plus importante pour le groupe 3 que pour le groupe 1 (0.271 vs 0.167).

Harmonicité. Aucun effet, simple ou d'interaction, n'est révélé par l'analyse intra-sujets, ni par les deux analyses inter-sujets.

2-4- Discussion

Le but de cette expérimentation était d'analyser les effets respectifs de l'amplitude et de la pratique, considérés comme facteurs indépendants, sur la variabilité de la fréquence et l'efficacité. Les sujets devaient pratiquer selon une amplitude déterminée (15, 22.5 ou 30 cm), durant quatre sessions. .

Les résultats concernant l'amplitude montrent que l'ensemble de nos sujets ont été capables de satisfaire nos exigences en termes d'amplitude. L'absence d'effets Session, Groupe X Session, ou Groupe X Session X Essai indique que chaque groupe (et spécialement le groupe 3) était capable d'atteindre dès le premier essai l'amplitude imposée. Aussi on peut considérer que la quantité de pratique, à l'amplitude cible, est identique pour tous les groupes. On peut noter que l'amplitude produite par chaque groupe est légèrement supérieure à l'amplitude requise. Ceci était dû à la flexibilité des tiges de fibre de verre, qui permettait aux sujets de poursuivre leur mouvement au-delà du contact.

On peut être étonné d'obtenir de telles amplitudes, avec des débutants sur le simulateur de ski. Dans la plupart des expérimentations précédentes, l'amplitude était limitée durant les premiers essais entre 10 et 20 cm (voir, par exemple, den Brinker *et al.*, 1986; van Emmerik *et al.*, 1989; Vereijken *et al.*, 1992). Comme nous l'avons noté, nos sujets étaient tous des skieurs occasionnels. Cependant, nos résultats concernant le coût du mouvement et

l'harmonicité indiquent qu'ils n'adoptent pas, au début de l'expérience, un comportement expert. D'un autre côté, les sujets dans les expériences précédentes ne recevaient jamais pour instruction d'atteindre une amplitude donnée, mais de faire des oscillations de la plus "grande amplitude possible". De nombreux travaux, dans le domaine du *goal-setting* ont montré que des buts spécifiques débouchaient sur de meilleures performances que les conditions 'faites de votre mieux' (Barnett & Staniceck, 1979; Hall, Weinberg, Bruya & Jackson, 1990; Boyce & Wayda, 1994).

Notre principale hypothèse concernant la variabilité de la fréquence est clairement validée. Lorsque l'amplitude cible augmente, la fréquence devient plus consistante entre sujets, et plus stable pour chaque sujet. Des tendances similaires sont obtenues avec la pratique. Ces résultats sont cohérents avec nos propositions: la pratique peut être considérée comme une recherche de solution optimale, et les contraintes d'amplitude tendent à canaliser cette recherche.

Cependant, si l'on considère qu'une telle canalisation pourrait faciliter le processus de recherche de la solution optimale, une interaction entre amplitude requise et pratique était attendue. Une telle interaction a été obtenue pour la variabilité inter-individuelle : avec la pratique, les sujets tendent à l'intérieur de chaque groupe à converger vers une fréquence commune, mais cette tendance est plus marquée dans le groupe qui oscille à grande amplitude. La variabilité inter-individuelles peut être considérée comme une mesure du poids des contraintes liées à l'appareil, dans l'ensemble des contraintes qui pèsent sur le comportement. Nos résultats suggèrent que ce poids devient plus important à forte amplitude.

Un travail antérieur de den Brinker *et al.* (1984) avait mis l'accent, au contraire, sur l'influence du poids corporel (une contrainte liée à l'organisme) dans la détermination de la fréquence préférée. Ce n'était clairement pas le cas dans cette expérimentation, ni dans celle de Durand *et al.* (1994), qui a été réalisée sur le même appareil. Néanmoins, d'importantes différences apparaissent dans les fréquences préférées, d'une expérimentation à l'autre. Généralement, Vereijken (1991) rapporte des valeurs situées autour de 0.7 Hz. Plus récemment, Wulf a réalisé deux expérimentations au cours desquelles les sujets produisirent des fréquences d'environ de 0.45 Hz (Wulf, Höß & Prinz, 1998; Wulf, Hörger & Shea, 1999). La fréquence préférentielle, sur notre appareil semble plus élevée (aux alentours de 1.1 Hz pour l'expérience de Durand *et al.*, de 0.84 à 1.18 Hz dans le présent travail). Des différences dans la raideur des bandes et également dans le réglage de la tension pourraient expliquer ces

différences. Il est intéressant de noter que même sur des appareils très similaires, de faibles différences de propriétés mécaniques peuvent engendrer d'importants décalages dans la hiérarchie du système des contraintes.

Cette interaction entre amplitude et pratique n'est pas obtenue pour la variabilité intra-individuelle de la fréquence, qui peut être considérée comme une mesure du pouvoir attractif de la fréquence de résonance individuelle. L'amplitude semble canaliser les sujets vers un comportement oscillatoire plus stable, mais la pratique ne tire aucun avantage de cet effet de canalisation. De ce point de vue, les effets de la pratique et de l'amplitude paraissent clairement indépendants.

Cette indépendance est confirmée par les résultats concernant l'efficacité et l'harmonicité. Ce résultat indique une réduction systématique du coût du mouvement et un accroissement de l'harmonicité au fur et à mesure des sessions, et au fil des essais à l'intérieur de chaque session. L'interaction Session X Essai montre que les progrès en efficacité sont plus importants au début de la pratique, et évoluent par la suite de manière asymptotique.

L'inspection des portraits de Hooke (Figure 2-7) suggère que les sujets apprennent progressivement à exploiter les forces réactives du système. La relation linéaire obtenue à la fin de l'expérimentation révèle un comportement harmonique de la plate-forme et montre que l'énergie potentielle stockée dans les bandes durant le déplacement est immédiatement restaurée après le point de revirement. Les portraits de Hooke durant les phases initiales de l'expérimentation révèle d'importantes non-linéarités, et particulièrement à proximité des points de revirement. Le déplacement de la plate-forme apparaît davantage comme la concaténation de mouvements discrets que comme un mouvement cyclique (Guiard, 1993).

Plus important, les effets de la pratique sur l'harmonicité et l'efficacité ne sont pas affectés par l'amplitude requise. En d'autres termes, l'optimisation de l'habileté semble indépendante de l'amplitude du mouvement.

Les résultats des tests de transfert méritent un examen approfondi. Clairement, la réduction de l'amplitude requise entraîne un accroissement de la variabilité intra-individuelle de la fréquence. Ce résultat n'est pas autrement surprenant, dans la mesure où les effets de la pratique et de l'amplitude requise, durant la première partie de l'expérimentation, apparaissent indépendants. On peut noter, cependant, que la variabilité intra-individuelle moyenne, pour le groupe 3, ne diffère pas de celle des autres groupes, à amplitude équivalente et après une

durée équivalente de pratique. On peut donc considérer que les effets de la pratique à grande amplitude sont effectivement transférés dans les essais à amplitude plus réduite. Cependant, ces résultats montrent que la pratique à forte amplitude ne procure aucun bénéfice substantiel, comparée à la pratique à faible amplitude. Le même raisonnement peut être soutenu en ce qui concerne les résultats d'harmonicité.

Les résultats concernant la variabilité inter-individuelle sont particulièrement intéressants, dans la mesure où le groupe 3 présente une variabilité supérieure à celle des autres groupes, à amplitude équivalente et après une durée équivalente de pratique. On doit se rappeler que nous avons montré dans la première partie de l'expérimentation que la pratique, sur le simulateur, induit une convergence des fréquences entre sujets, et que cette convergence est plus forte lorsque l'amplitude requise est élevée. Les résultats des transferts suggèrent que les sujets pratiquant à grande amplitude sont moins capables, lorsque l'on requiert des amplitudes plus faibles, de converger vers la fréquence optimale du système.

Comme le proposait Newell (Newell *et al.*, 1989 ; Newell, 1991), l'apprentissage moteur peut être considéré comme l'apprentissage du processus de recherche de la solution optimale dans un espace de travail perceptivo-moteur. De ce point de vue, les experts ne répètent pas d'un essai à l'autre le comportement expert en lui-même, mais le processus de recherche menant au comportement expert (Bernstein, 1967). D'un autre côté, les contraintes tendent à guider le comportement vers la solution optimale : plus précisément, un haut niveau de contrainte tend à faciliter le processus de recherche de la solution optimale. Donc, lorsqu'ils font face à un haut niveau de contraintes, on peut supposer que les sujets n'ont pas besoin de développer des stratégies très efficaces pour découvrir la solution optimale (Davids, Handford, & William, 1994). A l'inverse, un faible niveau de contrainte peut obliger les sujets à développer des stratégies plus sophistiquées. Une telle hypothèse pourrait expliquer pourquoi la variabilité inter-individuelle est plus haute dans les tests de transfert du groupe 3 que dans les autres groupes, à amplitude requise similaire.

En conclusion, cette expérimentation confirme que l'amplitude, sur le simulateur de ski, constitue un paramètre susceptible de contraindre la fréquence du mouvement. Les sujets oscillant à forte amplitude ont un comportement plus stable et une fréquence plus consistante. Ceci peut être analysé comme le renforcement d'un système de contraintes, menant à la stabilisation de la fréquence du comportement oscillant. De même, la pratique induit une stabilisation de la fréquence, mais les effets respectifs de la pratique et de l'amplitude

demeurent indépendants. De plus, les tests de transfert montrent que la pratique à forte amplitude n'est pas bénéfique en terme d'apprentissage. Plus généralement, cette expérimentation suggère qu'un jeu de contraintes qui guide de manière trop stricte vers la solution du problème moteur ne permet pas aux sujets de développer des stratégies de recherche efficaces.

CHAPITRE III : Modélisation d'une habileté complexe : les oscillations au simulateur de ski

3-1- Introduction

Récemment, un certain nombre de travaux ont tenté de modéliser les mouvements rythmiques en tant qu'oscillateurs auto-entretenus (e.g. Beek & Beek, 1988; Beek, Rikkert & van Wieringen, 1996; Beek, Schmidt, Morris, Sim & Turvey, 1995; Haken, Kelso & Bunz, 1985; Kay, Saltzman, Kelso & Schöner, 1987). Ces tentatives sont basées sur l'hypothèse selon laquelle le système nerveux central exploite des dynamiques de cycle limite pour produire des mouvements rythmiques. Le but est de produire des modèles macroscopiques, contenant un nombre réduit de paramètres², et capables de capturer les caractéristiques essentielles du mouvement. Ces équations dynamiques de mouvement expriment à un niveau abstrait les interactions des propriétés physiologiques des structures neurales sous-jacentes, et des propriétés (bio)mécaniques des systèmes oscillants. D'un point de vue théorique, cette proposition est supportée par l'idée que l'ordre macroscopique (décrit par ce type de modèles dynamiques) émerge des interactions non-linéaires entre les éléments microscopiques, mais en retour gouverne le fonctionnement des sous-systèmes (Beek, Peper & Stegeman, 1995; Haken, 1983).

Dans ce cadre, les mouvements rythmiques sont modélisés en tant qu'oscillateurs obéissant à des équations différentielles de second ordre du type:

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

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 l'amortissement, et le troisième la raideur. 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

² Ce critère de minimalité est nécessaire, pour une estimation valide des coefficients du modèle au moyen des procédures de régression multiple.

Beek et Beek (1988) ont montré que les fonctions de raideur et d'amortissement étaient nécessairement composées de termes $x^p \dot{x}^q$ ($p, q: 0, 1, 2, 3, \dots$), et qu'un catalogue limité de tels termes se révélait viables. Le but des auteurs était de rendre compte des phases successives du mouvement de la main dans le jonglage, en termes de dynamique quantitative d'un oscillateur autonome. Développant un modèle basé sur des polynômes de type Chebybev, ils ont montré que la représentation continue d'un tel mouvement imposait certaines restrictions dans le choix des termes à inclure dans le modèle. Plus précisément, $g(x)$ devait être composé de termes issus de la série de Duffing (x^1, x^3, x^5, \dots), et $f(x, \dot{x})$ de termes issus de la série de Van der Pol ($x^0 \dot{x}, x^2 \dot{x}, x^4 \dot{x}, \dots$) et/ou de la série de Rayleigh ($\dot{x}^1, \dot{x}^3, \dot{x}^5, \dots$), séparément ou en combinaison. Ils ont montré également la viabilité, au-delà des fonctions non-linéaire bien connues de Rayleigh et Van der Pol, d'un nouveau type de séries qu'ils ont nommées les séries π -mix (termes pairs: $x^2 \dot{x}^3, x^4 \dot{x}^5, \dots$; termes impairs: $x^3 \dot{x}^2, x^3 \dot{x}^4, \dots$). Des travaux récents ont montré que ce catalogue était suffisant pour construire des modèles susceptibles de rendre compte des caractéristiques cinématiques essentielles de divers mouvements rythmiques ou discrets (e.g. Beek *et al.*, 1995, 1996; Zaal, Bootsma & van Wieringen, 1998; Mottet & Bootsma, 1999).

Plusieurs méthodes sont envisageables pour déterminer la nature des fonctions de raideur et d'amortissement, et pour établir l'importance relative de la contribution de chaque terme. Une première méthode a été proposée par Kay *et al.* (1987) pour la modélisation de la dynamique de mouvement d'oscillation mono- et bimanuelle. Faisant l'hypothèse de la linéarité de la fonction de raideur, ils ont essayé d'analyser les relations entre fréquence et amplitude, ainsi que les relations entre fréquence et pic de vitesse, pour déterminer la composition de la fonction d'amortissement. Suite à cette analyse, ils proposèrent un modèle hybride, combinant des termes non-linéaires de Rayleigh et de Van der Pol. Utilisant la même méthode, Beek *et al.* (1996) ont montré qu'une version modifiée, incluant un terme de Rayleigh asservi à la fréquence, rendait mieux compte des données individuelles. Dans la mesure où ces deux expérimentations rendaient compte d'oscillateurs anatomiques différents (des mouvements du poignet et du coude, respectivement), les auteurs expliquaient cette divergence entre leurs résultats et ceux de Kay *et al.* (1987) par des différences dans les propriétés biomécaniques, tels que les moments d'inertie, et les caractéristiques de raideur et d'amortissement.

Beek et Beek (1988) ont proposé une méthode graphique, qui peut être utilisée pour révéler la présence de termes non-linéaires spécifiques dans les fonctions de raideur et d'amortissement. Exploitant la présence, dans ces termes, d'éléments aisément identifiables graphiquement (tels que x^2 , x^3 or x^4), les auteurs ont montré que des représentations graphiques spécifiques permettaient de rechercher de manière spécifique l'expression locale de termes non-linéaires. Cette méthode, appliquée au mouvement de jonglage, révéla la présence de comportements locaux de type Duffing et van der Pol. Cette méthode sera expliquée en détail dans la partie *Méthode*.

Une procédure statistique additionnelle (dite *W-method*) a également été proposée par Beek et Beek (1988) (voir aussi Beek *et al.* ,1995). Leur point de départ est une expression de l'équation (1) sous la forme suivante:

$$\ddot{x} + x + W(x, \dot{x}) = 0, \quad (2)$$

où $W(x, \dot{x})$ regroupe les contributions de tous les termes linéaires et non-linéaires des composantes dissipatives et conservatives du mouvement (c'est-à-dire, les déviations du mouvement oscillatoire, par rapport au mouvement harmonique parfait). $W(x, \dot{x})$ peut aisément être calculé à partir des données cinématiques, et se trouve utilisée comme variable dépendante, dans une procédure de régression multiple incluant l'ensemble des termes autorisés, afin de déterminer leur contributions respectives. Beek et al. (1995) ont utilisé cette méthode pour déterminer les contributions des termes non-linéaires de raideur et d'amortissement dans l'oscillation de pendules. Cette procédure a permis de proposer un modèle incluant une terme cubique de Duffing, un terme π -mix de forme $x\dot{x}^2$, et une combinaison de termes d'amortissement de type van der Pol (\dot{x} , $x^2\dot{x}$). Les auteurs décrivent des modifications systématiques des coefficients du modèle, suivant des manipulations expérimentales de l'inertie, de la fréquence, et de l'amplitude.

Utilisant une version modifiée de la *W-method* (voir paragraphe suivant), Mottet et Bootsma (1999) ont montré que la dynamique de l'effecteur, dans une tâche de pointage réciproque de Fitts, pouvait être modélisée de manière précise avec un terme non-linéaire de raideur de Duffing (x^3) et un terme non-linéaire d'amortissement de Rayleigh (\dot{x}^3). Ce modèle permettait de reproduire les principales caractéristiques cinématiques du mouvement, et rendait compte de 95% de la variance. Ils ont également montré que les coefficients du

modèles étaient modifiés de manière systématique lorsque les contraintes d'amplitude et de précision variaient.

Beek *et al.* (1995) notent que la précision de la W-method est meilleure pour l'estimation des termes de raideur que pour les termes d'amortissement, dans la mesure où cette méthode peut souffrir de l'incapacité de la régression multiple de prendre en compte les contraintes de signe requises pour obtenir des modèles auto-entretenus. En effet, pour donner lieu à un comportement de cycle limite, le terme d'amortissement linéaire doit être négatif, et au moins un des termes non-linéaires d'amortissement doit être positif. Mottet et Bootsma (1999) notent que l'utilisation de la régression en utilisant tous les termes envisageables pour la fonction $W(x, \dot{x})$ mène le plus souvent à des résultats inconsistants (e.g. des modèles instables, ou des coefficients d'amortissement linéaire non significatifs). C'est pourquoi l'utilisation dans un premier temps des méthodes graphiques pour dériver un premier modèle minimal semble un bon préliminaire à l'application de la W-method.

Nous avons utilisé dans ce travail les données de position recueillies lors de l'expérimentation précédente, sur le simulateur de ski. Notre but était de construire un modèle dynamique des mouvements d'oscillations de la plate-forme, et d'analyser l'évolution des coefficients du modèle, avec la pratique et avec la manipulation des contraintes d'amplitude. On considère que la dynamique de la plate-forme contient des informations essentielles, capturant la dynamique globale du système (Vereijken, 1991; Vereijken *et al.*, 1992).

XX

3-2- Modélisation

La stratégie de modélisation que nous avons utilisé est basée sur l'analyse de cycle moyens normalisés, sensé représenter l'organisation dynamique qui émerge en réponse aux contraintes de la tâche. On suppose que l'attracteur ne change pas durant le temps d'observation (c'est-à-dire à l'intérieur d'un essai donné), et que les fluctuations stochastiques, au niveau microscopique, constituent un bruit aléatoire, distribuant le comportement observé autour du pattern attracteur.

Notre méthode combine des analyses qualitatives graphiques, pour identifier les composantes non-linéaires susceptibles de décrire les mouvements de la plate-forme, et des

procédures statistiques, pour estimer la contribution respective de chaque composante, et leur évolution avec la pratique et l'amplitude requise.

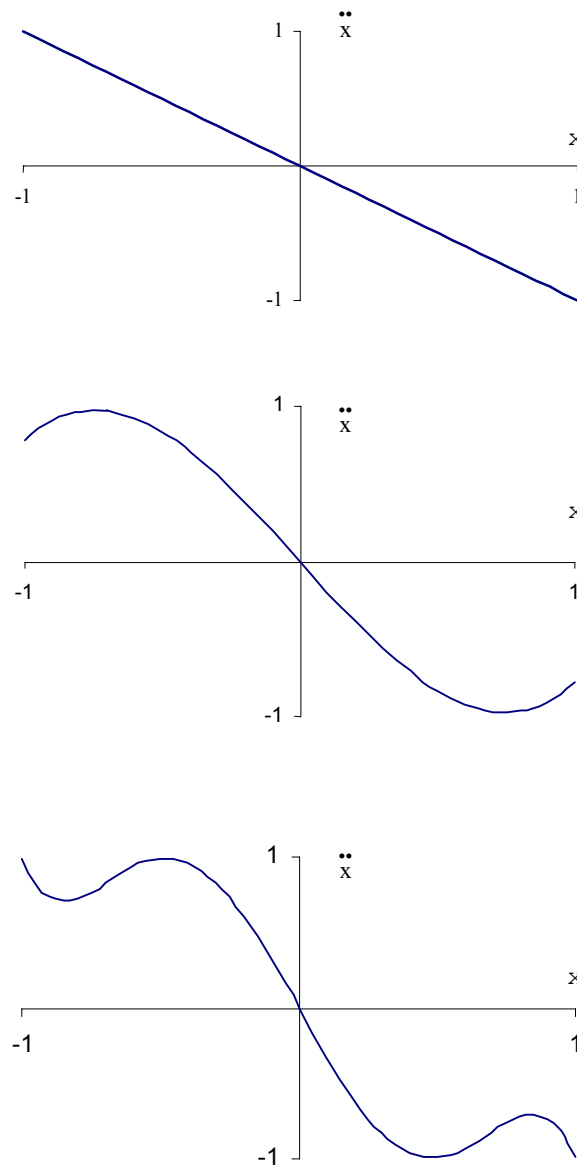


Figure 3-1: Portraits de Hooke (position vs accélération). Le graphique du haut représente un oscillateur harmonique parfait. Les deux autres graphiques illustrent l'influence de termes de raideur de Duffing cubique (au milieu) et quintique (en bas). Equations: $\ddot{x} + x = 0$; $\ddot{x} + x - 0.6x^3 = 0$ et $\ddot{x} + x - 1.9x^3 + 1.2x^5 = 0$, respectivement. Pour des facilités de présentation, les données d'accélération ont été réétablies dans l'intervalle $[-1, +1]$.

Nous avons tout d'abord utilisé des portraits de Hooke (position vs. accélération) pour identifier directement la fonction de raideur (Guiard, 1993; Mottet & Bootsma, 1999). Le

portrait de Hooke est une ligne droite dans le cas d'un oscillateur harmonique. Les déviations par rapport à cette ligne droite donnent des informations essentielles pour l'identification des termes non-linéaires à inclure dans le modèle. Quelques portraits typiques sont présentés en figure 1-1, avec en haut la ligne droite obtenue pour un oscillateur harmonique ($\ddot{x} + x = 0$), et au centre la courbe en N révélant la présence d'un terme négatif cubique de Duffing ($\ddot{x} + x - x^3 = 0$). Le graphique du bas a été obtenu par l'inclusion, dans la précédente équation, d'un terme positif quintique de Duffing ($\ddot{x} + x - x^3 + x^5 = 0$).

De même, la détermination des termes non-linéaires d'amortissement ne s'opère pas directement. L'utilisation de la méthode de la régression multiple peut être possible ; en testant l'ensemble des termes viables (i.e. x , x^3 , x^5 , \dot{x} , \dot{x}^3 , $x^2\dot{x}$, voir Beek & Beek, 1988). Cependant, comme il a été dit précédemment, la régression est incapable de prendre en compte les contraintes de signe sur les coefficients d'amortissement qui sont requises pour générer une dynamique de cycle limite. Aussi nous avons également utilisé à ce niveau, une analyse graphique pour déterminer a priori les termes pertinents. Pour isoler la contribution de l'amortissement non-linéaire, nous avons d'abord réalisé une régression de $-\ddot{x}$ contre tous les termes précédemment identifiés : termes linéaires et non-linéaires de raideur ainsi que l'amortissement linéaire (\dot{x}). Les résidus (RES) de cette régression sont sensés représenter la contribution des termes d'amortissement non-linéaire sur le comportement. Puis nous avons appliqué les principes proposés par Beek et Beek (1988). Par exemple pour rechercher des comportements locaux de van der Pol ou Rayleigh, nous avons respectivement représenté RES/\dot{x} en fonction de x ou RES en fonction de \dot{x} .

Le but de cette analyse graphique était de déterminer un modèle dynamique minimum, contenant un ensemble réduit de termes pertinents. Ensuite, l'importance relative de chaque coefficient a été estimée par régression multiple, comme suggéré dans la W-method (Beek & Beek, 1988).

3-3- Méthode

3-3-1- Protocole expérimental.

Nous avons donc utilisé dans ce travail les données recueillies lors de l'expérimentation présentée dans le chapitre précédent (voir chapitre II, partie 2-2, pour les détails du protocole). Rappelons que quinze sujets participaient à cette expérimentation. Les sujets étaient répartis aléatoirement en trois groupes expérimentaux. Ils devaient réaliser des séries d'oscillations sur un simulateur de ski, selon des amplitudes déterminées, soit 15 cm pour le groupe 1, 22.5 cm pour le groupe 2, et 30 cm pour le groupe 3.

Les sujets ont réalisé quatre sessions comprenant chacune quatre essais de quatre minutes, séparés par quatre minutes de repos. Les sujets n'ont pas bénéficié de démonstration. Il leur était demandé de réaliser la tâche le plus confortablement possible (c'est-à-dire à leur fréquence préférée).

3-3-2- Réduction des données

La position du centre de la plate-forme a été mesurée en continu par un potentiomètre, et enregistrée à une fréquence de 100 Hz. Les traitements présentés ici, se sont centrés sur les 15 premières secondes de la troisième minute du premier essai de chaque session. La quantité cumulée de pratique, avant l'enregistrement des échantillons sélectionnés, était donc de 2, 18, 32, et 50 minutes, respectivement. 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 les résultats nous sont apparus appropriée pour préserver les caractéristiques essentielles du signal.

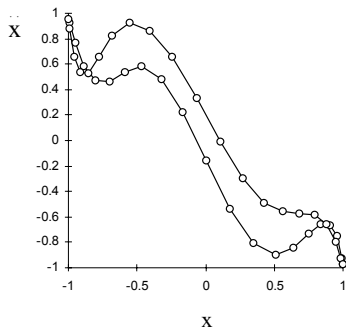
Chaque échantillon, par la suite, a été résumé en un cycle moyen normalisé. Cette procédure a été réalisée selon les étapes suivantes. Tout d'abord, les séries de 15 secondes ont été segmentées en demi-cycles, représentant le mouvement d'un point de revirement au suivant. Chaque demi-cycle a ensuite été normalisé dans le temps selon 21 points équidistants, par un processus d'interpolation linéaire. Ces points ont ensuite été réétalonnés dans l'intervalle $[-1,+1]$. Les demi-cycles normalisés commençant au même point de revirement (droite ou gauche) ont ensuite été moyennés point par point, puis un cycle moyen

normalisé (sur 42 points) a été constitué en combinant les deux demi-cycle normalisé aller et retour. Les dérivées premières et secondes ont été calculées à partir de ce cycle moyen, et réétalonnés dans l'intervalle $[-1,+1]$. Comme on peut le voir, nos données étaient donc normalisées à la fois par rapport au temps (pour permettre le moyennage des cycle) et par rapport à l'amplitude. La normalisation de l'amplitude, pour les données de position mais également pour les données de vitesse et d'accélération, visait à faciliter les comparaisons inter-groupes dans les analyses graphiques (voir section suivante, Figure XX).

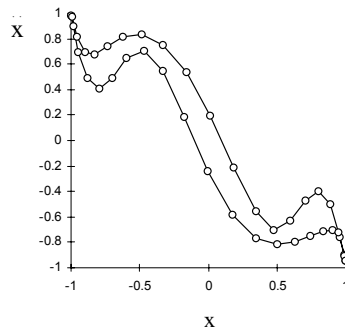
Les échantillons de 15 secondes ont permis le calcul d'un minimum de 10 et d'un maximum de 18 cycles normalisés (avant moyennage), en fonction de la fréquence du mouvement. Afin de vérifier la consistance de la dynamique de la plate-forme durant ces intervalles de 15 secondes, nous avons calculé la corrélation entre chaque cycle normalisé et le cycle moyen correspondant. Dans tous les cas cette corrélation était proche de 1 (valeur moyenne: 0.998) ; indiquant une grande stabilité de la dynamique de la plate forme, pour chaque sujet et à l'intérieur de chaque intervalle de 15 secondes.

Finalement, 12 cycles moyens de groupe (3 amplitudes x 4 sessions) ont été calculés, par un moyennage point par point des cycles normalisés individuels correspondants. La Figure 3-2 représente les portraits de Hooke (accélération vs position) obtenus dans chaque condition.

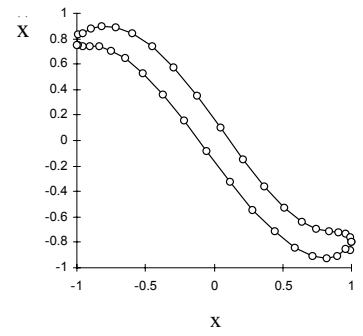
Amplitude 30cm



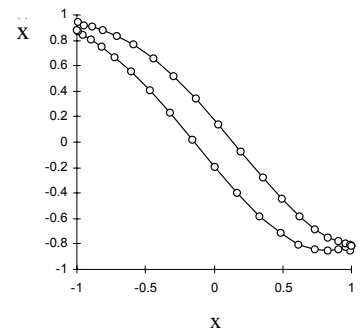
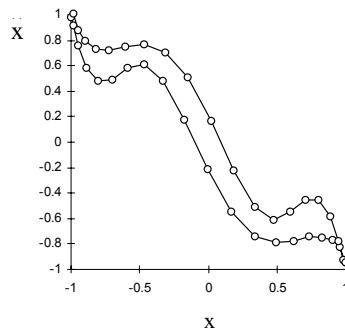
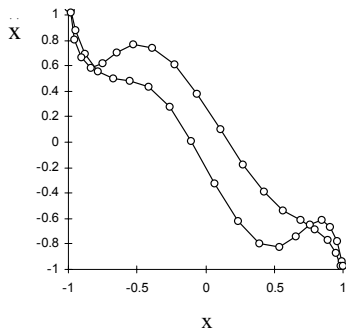
Amplitude 22.5cm



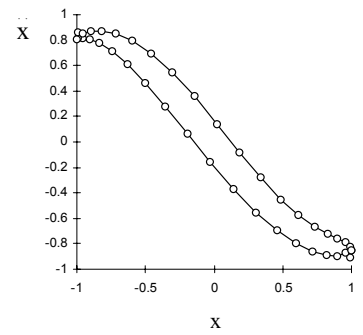
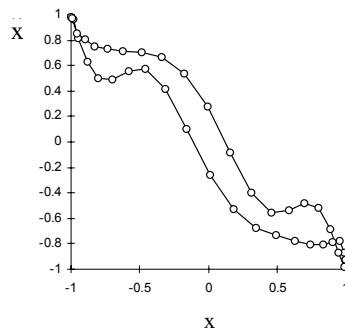
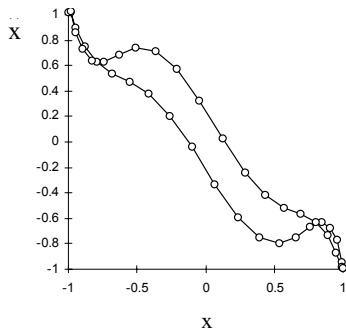
Amplitude 15cm



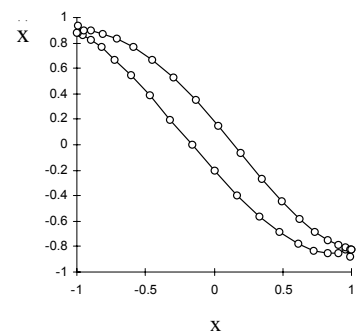
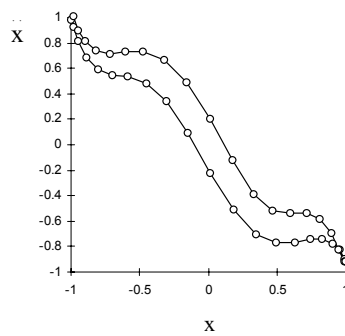
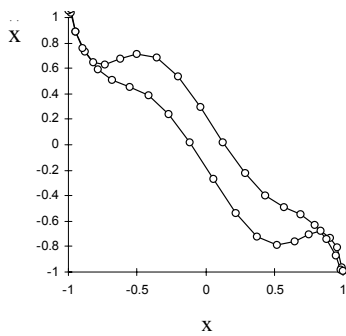
Session 1



Session 2



Session 3



Session 4

Figure 3-2: Portraits de Hooke moyens normalisés (accélération vs position), en fonction de l'amplitude requise (de droite à gauche) et des sessions de pratique (de haut en bas).

3-4- Résultats

3-4-1- Modélisation de groupe

A partir des r^2 de la régression linéaire de la position sur l'accélération, qui représente une mesure de la variance qui peut être attribuée à un mouvement simple harmonique, il est possible d'évaluer la contribution relative des termes non-linéaires au travers de la quantité $1-r^2$ (Mottet & Bootsma, 1999). Une ANOVA 3 (Amplitude) x 4 (Session) indique un effet significatif de l'amplitude (valeurs moyennes de $1-r^2$, groupe 1: 0.045; groupe 2: 0.090; groupe 3: 0.085; $F_{2,12}=9.406$, $p<.005$). Les tests post-hoc montrent que la contribution des termes non-linéaires est significativement plus importante dans les groupes 2 et 3 que dans le groupe 1. Un effet Session est également obtenu (session 1: 0.105, session 2: 0.068, session 3: 0.064, session 4: 0.058; $F_{3,36}=22.801$, $p<.001$), avec des tendances significatives linéaires et quadratique ($F_{1,12}=27.061$, $p<.001$; et $F_{1,12}=28.528$, $p<.001$, respectivement). Cet effet indique une diminution, graduelle mais asymptotique de la contribution des termes non-linéaires avec la pratique. Enfin, aucune interaction entre pratique et amplitude n'est obtenue.

Une inspection visuelle des portraits de Hooke (voir Figure 3-2), et plus particulièrement pour les conditions d'amplitude 30 et 22.5 cm, indique que la raideur tend localement à décroître à l'approche des points de revirement, avant de croître à nouveau au point de revirement. Ceci suggère qu'un terme négatif cubique (x^3), et un terme positif quintique (x^5) de Duffing doivent être inclus dans la fonction de raideur de l'équation de mouvement:

$$g(x) = x - x^3 + x^5$$

Les termes non-conservatifs d'amortissement doivent être déterminés indirectement. Comme indiqué précédemment, nous avons utilisé une méthode graphique adaptée de Beek et Beek (1988). Tout d'abord nous avons calculé les résidus (RES) de la régression de x , x^3 , x^5 et \dot{x} sur \ddot{x} . Ensuite nous avons recherché l'expression de comportement de type van der Pol en représentant RES/\dot{x} en fonction de x (dans ce cas une parabole est attendue), de comportements de type Rayleigh en représentant RES en fonction de \dot{x} (recherchant alors une courbe en N). Une recherche de comportement pour le π -mix a été également réalisée, en

représentant RES/\dot{x} en fonction de $x\dot{x}$ (recherchant une parabole pour les comportements π -mix pairs, et une courbe en N pour les comportements π -mix impairs, voir Beek & Beek, 1988).

Dans 9 cas sur 12, ces analyses graphiques ont révélé pour les cycles normalisés de groupe un comportement de type van der Pol (Figure 1-3, graphique de gauche), suggérant donc une équation générale du type:

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

Dans cette équation, les coefficients sont indexés selon la notation de la W-method proposée par Beek et Beek (1988), dans laquelle c_{ij} est le coefficient du terme $x^i\dot{x}^j$.

Dans les cas restants, deux 1-3, graphique de droite), suggérant l'addition d'un terme quadratique de van der Pol dans le modèle:

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{21}x^2\dot{x} + c_{41}x^4\dot{x} = 0 \quad (4)$$

A ce niveau d'analyse, aucun trace de comportement Rayleigh ou π -mix n'est mis en évidence.

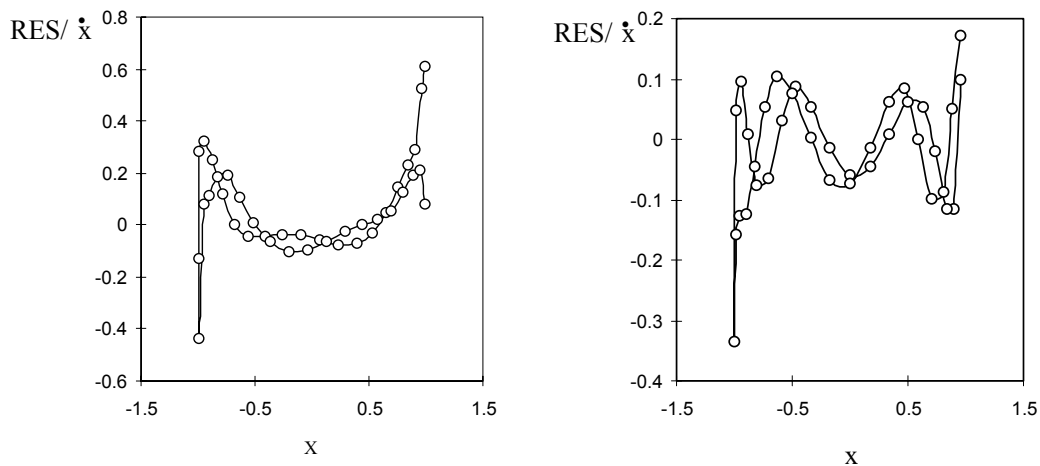


Figure 3-3: Recherche graphique des comportement de van der Pol. A gauche, données du groupe 3, session 1; à droite, données du groupe 2, session 1.

La forme des portraits de Hooke suggère que c_{30} est négatif et c_{50} positif. De plus, pour déboucher sur un comportement de cycle limite, c_{01} doit être négatif et c_{21} positif dans l'équation 3, et c_{21} et/ou c_{41} positif dans l'équation (4).

Ces coefficients ont été estimés par une régression multiple de tous les termes sélectionnés x , x^3 , x^5 , \dot{x} et $x^2\dot{x}$ (plus éventuellement $x^4\dot{x}$ dans les cas où ce terme était apparu nécessaire) sur \ddot{x} . Ces régression ont montré que les équations (3) et (4) permettaient de rendre compte avec précision du comportement observé, avec des coefficients r^2 de 0.992 à 1.000, et une valeur moyenne de 0.997. Le meilleur ajustement a été obtenu pour les données du groupe 1 (15 cm). Comme on peut le voir sur le tableau XX, les valeurs estimées pour les coefficients de raideurs sont des signes attendus, c_{10} et c_{50} étant positifs, et c_{30} négatif. De plus, les contraintes de signes pour les coefficient d'amortissement sont respectées dans la plupart des cas, avec des valeurs négatives pour c_{01} , positives pour c_{21} , et négatives pour le coefficient c_{41} (lorsqu'il est présent).

Une inspection visuelle du tableau 3-1 suggère un effet de l'amplitude du mouvement sur les coefficients de raideur: si l'on considère les valeurs absolues, c_{10} , c_{30} et c_{50} semblent plus faibles pour le groupe 1 que pour les deux autres groupes et sans différences apparentes entre les groupes 2 et 3. Un effet de l'amplitude sur le coefficient d'amortissement linéaire semble plausible, avec des évaluations plus élevées (en valeurs absolues) pour le groupe 3 que pour les groupes 1 et 2. Enfin, c_{21} semble plus faible pour le groupe 1 que pour le groupe 3. Le tableau 3-1 suggère également un effet systématique de la pratique sur le coefficients de raideur, avec une diminution progressive (en valeurs absolues) des estimations de c_{10} , c_{30} et c_{50} . Il n'y a pas de tendance claire pour les coefficients d'amortissement. Cet examen apporte quelques idées sur les effets respectifs de l'amplitude et de la pratique sur les fonctions de raideur et d'amortissement, mais ces intuitions (malgré tout) doivent être confirmées par des traitements statistiques réalisés sur les données individuelles.

Groupe	Session	c ₁₀	c ₃₀	c ₅₀	c ₀₁	c ₂₁	c ₄₁	c ₀₃	r ²
1	1	1.543	-0.609	0.033	-0.158	0.028	-0.037	-	1.000
	2	1.349	-0.380	0.003 ^a	-0.173	0.025	-	-	0.999
	3	1.381	-0.424	0.016	-0.171	0.023	-	-	1.000
	4	1.352	-0.427	0.055	-0.182	0.039	-	-	0.999
2	1	2.135	-1.971	0.871	-0.185	0.103	-0.085	-	0.996
	2	1.950	-1.700	0.792	-0.189	0.113	-0.088	-	0.996
	3	1.795	-1.410	0.643	-0.166	0.016 ^a	-	-	0.992
	4	1.720	-1.250	0.550	-0.196	0.059	-	-	0.998
3	1	2.168	-2.002	0.845	-0.221	0.091	-	-	0.993
	2	1.833	-1.516	0.699	-0.253	0.141	-	-	0.997
	3	1.686	-1.285	0.621	-0.240	0.124	-	-	0.998
	4	1.548	-1.069	0.545	-0.229	0.108	-	-	0.997

^a Non significativement différent de zéro sur un t-test.

Tableau 3-1: Estimations des coefficients de raideur et d'amortissement pour les cycles moyens normalisés pour les groupes.

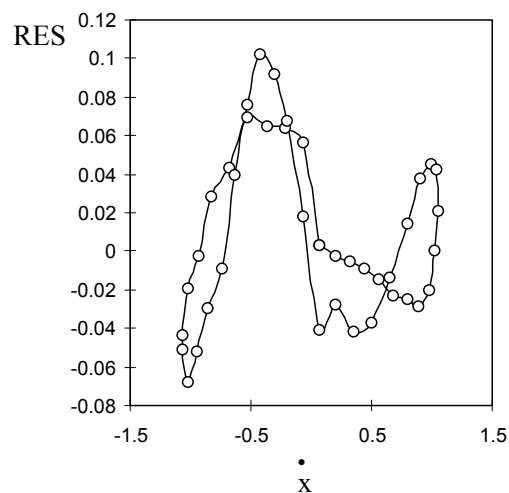


Figure 3-4: Recherche graphique de comportements de type Rayleigh. Données du sujet 1.2., session 1.

3-4-2- Modélisations individuelles.

Les mêmes procédures graphiques et statistiques ont été appliquées aux cycles normalisés individuels. Pour 37 des cycles individuels (62%), l'équation (3) s'est révélée la plus pertinente, alors que l'équation (4) donnait une meilleure description des données pour 18 autres cycles individuels (30%).

Pour un des sujets du groupe 1, la représentation RES en fonction de \dot{x} a révélé un comportement de type Rayleigh (voir Fig. 3-4). Par contre la représentation de RES/\dot{x} en fonction x n'a pas permis dans ce cas de mettre en évidence un quelconque comportement de type van der Pol. Aussi, pour ce sujet, l'équation (4) a été utilisée pour l'estimation des coefficients. On peut noter aussi que pour un essai de l'un des sujets du groupe 2 (voir tableau 3-1), ce modèle Duffing+Rayleigh apparaissait également comme le plus approprié pour ajuster les données.

Ces modèles ont donné des ajustements corrects des données expérimentales, avec des r^2 de 0.955 à 1.000, avec une moyenne de 99.2 % de variance expliquée. Comme on peut le voir dans les tableaux 3-2, 3-3 et 3-3, les valeurs estimées pour les coefficients de raideurs c_{10} et c_{30} avaient les signes attendus (positifs pour les premiers, négatifs pour les seconds). Le coefficient c_{50} était dans la plupart des cas positif, mais apparaissait parfois négatif dans le groupe 1 (dans 9 cas sur un total de 20). Cependant, il est à noter que dans ces cas, la valeur estimée n'était pas significativement différente de zéro, à l'exception du sujet 1.5., session 2.

Sujet	Session	c ₁₀	c ₃₀	c ₅₀	c ₀₁	c ₂₁	c ₄₁	c ₀₃	r ²
1.1.	1	1.430	-0.476	0.016 ^a	-0.158	0.004 ^a	-	-	0.999
	2	1.336	-0.343	-0.032 ^a	-0.207	0.073	-	-	0.998
	3	1.320	-0.354	0.000 ^a	-0.215	0.086	-	-	1.000
	4	1.176	-0.188	-0.023 ^a	-0.241	0.121	-	-	0.999
1.2.	1	1.528	-0.573	0.007 ^a	-0.287	-	-	0.138	0.998
	2	1.362	-0.366	-0.026 ^a	-0.180	-	-	0.025 ^a	0.998
	3	1.413	-0.455	0.002 ^a	-0.111	-	-	-0.048	0.999
	4	1.356	-0.373	-0.008 ^a	-0.221	-	-	0.070	0.999
1.3.	1	1.724	-0.791	-0.006 ^a	-0.191	0.045	-	-	0.994
	2	1.234	-0.281	0.012 ^a	-0.251	0.138	-	-	0.998
	3	1.398	-0.442	0.010 ^a	-0.193	0.054	-	-	0.999
	4	1.208	-0.218	-0.022 ^a	-0.219	0.092	-	-	0.995
1.4.	1	1.400	-0.575	0.170	-0.204	0.110	-0.051	-	0.999
	2	1.356	-0.474	0.113	-0.147	0.002 ^a	-0.019 ^a	-	0.997
	3	1.294	-0.375	0.078	-0.156	0.042 ^a	-0.054	-	0.999
	4	1.488	-0.762	0.290	-0.164	0.083	-0.095	-	0.999
1.5.	1	1.651	-0.682	-0.018 ^a	-0.125	0.021 ^a	-0.096	-	0.999
	2	1.495	-0.505	-0.027	-0.143	0.022	-0.056	-	1.000
	3	1.498	-0.533	-0.002 ^a	-0.144	-0.002 ^a	-0.022 ^a	-	0.997
	4	1.508	-0.578	0.029 ^a	-0.191	0.049	-	-	0.998

^a Non significativement différent de zéro sur un t-test.

Tableau 3-2: Estimation des coefficients de raideur et d'amortissement pour les cycles normalisés individuels du groupe 1 (amplitude 15 cm).

Les contraintes de signe pour les coefficients d'amortissement ont été satisfaites dans la plupart des cas ; excepté pour le sujet 3.1. session 1, avec des estimations négatives pour c₀₁ et c₂₁, et pour le sujet 1.5., session 3, avec des estimations négatives pour c₀₁, c₂₁ et c₄₁ (cependant dans ces deux cas les estimations pour c₂₁ et c₄₁ n'étaient pas significativement différentes de zéro) Un autre problème est apparu avec le sujet "Rayleigh" 1.2. (session 3) : nous avons obtenu des estimations négatives pour c₀₁ and c₀₃ (toutes deux significatives).

Dans tous les autres cas, l'amortissement linéaire est négatif, et au moins l'un des termes non-linéaire a un coefficient négatif, satisfaisant les exigences pour donner lieu à un comportement de cycle limite (Beek *et al.*, 1996).

Il est important de noter que, la plupart du temps, les violations des exigences de signe sont apparues dans le cas de faibles non-linéarités. Le fait que nos estimations ne soient pas différentes de zéro, ne signifie pas qu'elles soient égales à zéro (une hypothèse menant dans la plupart des cas à des modèle irréalistes), mais plutôt que le cycle limite ne contient pas assez d'information pour une évaluation valide de ces coefficients.

Sujet	Session	c ₁₀	c ₃₀	c ₅₀	c ₀₁	c ₂₁	c ₄₁	c ₀₃	r ²
2.1.	1	1.956	-1.604	0.690	-0.188	0.244	-0.273	-	0.997
	2	1.770	-1.435	0.725	-0.193	0.221	-0.227	-	0.996
	3	1.742	-1.207	0.485	-0.164	0.062 ^a	-0.067	-	0.997
	4	1.879	-1.350	0.472	-0.113	-0.121	0.078	-	0.999
2.2.	1	1.777	-1.326	0.583	-0.167	0.166 ^a	-0.204	-	0.986
	2	1.872	-1.554	0.722	-0.163	0.088 ^a	-0.107 ^a	-	0.988
	3	2.137	-2.015	0.905	-0.296	-	-	0.148	0.974
	4	1.764	-1.502	0.798	-0.251	0.332	-0.262	-	0.993
2.3.	1	2.284	-2.401	1.123	-0.244	0.124	-	-	0.961
	2	2.044	-1.914	0.887	-0.212	0.080	-	-	0.975
	3	1.622	-1.359	0.766	-0.187	0.046 ^a	-	-	0.955
	4	1.736	-1.542	0.859	-0.162	0.010 ^a	-	-	0.981
2.4.	1	2.399	-2.454	1.076	-0.213	0.076	-	-	0.995
	2	2.054	-2.043	1.046	-0.177	0.028 ^a	-	-	0.993
	3	1.988	-1.835	0.867	-0.236	0.116	-	-	0.983
	4	1.919	-1.543	0.606	-0.297	0.203	-	-	0.996
2.5.	1	2.268	-2.079	0.836	-0.167	0.132	-0.167	-	0.995
	2	1.957	-1.471	0.513	-0.194	0.107	-0.074	-	0.997
	3	1.437	-0.595	0.146	-0.195	0.099	-0.055	-	0.998
	4	1.265	-0.293	0.002 ^a	-0.211	0.101	-0.027	-	0.998

^a Non significativement différent de zéro sur un t-test.

Tableau 3-3: Estimation des coefficients de raideur et d'amortissement pour les cycles normalisés individuels du groupe 2 (amplitude 22.5 cm).

Sujet	Session	c ₁₀	c ₃₀	c ₅₀	c ₀₁	c ₂₁	c ₄₁	c ₀₃	r ²
3.1.	1	2.558	-2.239	0.603	-0.162	-0.007 ^a	-	-	0.977
	2	1.961	-1.695	0.765	-0.184	0.040	-	-	0.997
	3	1.841	-1.472	0.656	-0.192	0.052	-	-	0.996
	4	1.102	-0.125	0.013 ^a	-0.182	0.040	-	-	0.998
3.2.	1	1.875	-1.680	0.785	-0.344	0.272	-	-	0.973
	2	1.457	-0.824	0.323	-0.367	0.305	-	-	0.997
	3	1.138	-0.301	0.122	-0.344	0.272	-	-	0.999
	4	1.733	-1.412	0.690	-0.278	0.179	-	-	0.991
3.3.	1	2.412	-2.493	1.087	-0.237	0.110	-	-	0.982
	2	2.073	-2.020	0.964	-0.274	0.170	-	-	0.986
	3	1.827	-1.492	0.648	-0.316	0.232	-	-	0.985
	4	1.703	-1.384	0.698	-0.255	0.144	-	-	0.984
3.4.	1	1.715	-1.360	0.675	-0.224	0.100	-	-	0.997
	2	1.584	-1.130	0.567	-0.238	0.120	-	-	0.995
	3	1.601	-1.256	0.689	-0.240	0.122	-	-	0.993
	4	1.429	-0.962	0.573	-0.204	0.072	-	-	0.996
3.5.	1	2.245	-2.125	0.901	-0.152	-0.010 ^a	-	-	0.988
	2	2.119	-1.979	0.884	-0.213	0.082	-	-	0.995
	3	1.988	-1.867	0.936	-0.131	-0.040 ^a	-	-	0.991
	4	1.721	-1.362	0.673	-0.210	0.079	-	-	0.994

^a *a* Non significativement différent de zéro sur un t-test.

Tableau 3-4: Estimation des coefficients de raideur et d'amortissement pour les cycles normalisés individuels du groupe 3 (amplitude 30 cm).

Des ANOVAs 3 (Amplitude) x 4 (Session) ont été réalisées sur les estimation individuelles de chaque coefficient. Ces analyses ont mis en évidence un effet Amplitude pour les coefficients c₁₀, c₃₀, et c₅₀ ($F_{1,12}=14.081$, $p<.001$; $F_{1,12}=22.690$, $p<.001$; et $F_{1,12}=26.417$, $p<.001$, respectivement). Les tests post-hoc ne révèlent aucune différence pour ces coefficients entre les groupes 2 (22.5 cm) et 3 (30 cm); c₁₀, c₃₀ et c₅₀ sont significativement plus faibles (en valeurs absolues) pour le groupe 1 (15 cm) que pour les deux autres groupes. Un effet significatif de la pratique est également obtenu pour les trois coefficients ($F_{3,36}=18.029$, $p<.001$; $F_{3,36}=16.623$, $p<.001$; et $F_{3,36}=8.126$, $p<.001$,

respectivement). Dans tous les cas une forte tendance linéaire est décrite ($F_{1,12}=29.253$, $p<.001$; $F_{1,12}=26.928$, $p<.0001$; et $F_{1,12}=25.628$, $p<.001$, respectivement). Cependant les tests post-hoc indiquent que la diminution de c_{10} , et de c_{30} (en valeurs absolue) n'est significative qu'entre la première et la troisième session et sans différence entre les deux dernières sessions. Les tests post-hoc sur c_{50} n'indiquent qu'une diminution significative entre les sessions 2 et 3. Enfin, aucun effet d'interaction entre pratique et amplitude n'est obtenu

L'analyse statistique des coefficients individuels c_{01} n'est pas parvenue à confirmer l'effet Amplitude suggéré par les données de groupe (voir tableau 3-1). Aucun effet n'est obtenu, ni pour l'amplitude, ni pour la pratique. Les effets de la pratique et de l'amplitude sur les termes non-linéaire sont difficiles à estimer, dans la mesure où les fonctions d'amortissement non-linéaire sont fortement individualisées. Une ANOVA a été cependant réalisée sur les coefficients c_{12} (van der Pol), en prenant en compte les 9 sujets présentant tout au long de l'expérimentation un comportement de type van der Pol d'ordre 2 (2 sujets pour le groupe 1, 2 pour le groupe 2, 5 sujets pour le groupe 3). Cette analyse n'a mis en évidence aucun effet simple ni d'interaction.

3-5- Discussion

Une analyse graphique nous a permis d'identifier les termes à inclure dans un modèle minimal des mouvements de la plate-forme. Cette analyse, réalisée sur les cycles moyens normalisés des groupes, a révélé la présence de deux termes de raideur non-linéaire de Duffing, cubique et quintique, et d'un ou deux termes d'amortissement issus de la série de van der Pol. Une analyse quantitative subséquente a montré que ce modèle dynamique combinant des termes de Duffing et de van der Pol, était capable de capturer de manière adéquate les caractéristiques essentielles du mouvement de la plate-forme. L'identification des termes pertinents par l'analyse graphique apparaît comme un préliminaire indispensable avant l'application de procédures quantitatives telles que la W-method (voir également Mottet & Bootsma, 1999).

Nos tentatives de modélisations individuelles ont montré que ce modèle Duffing + Van der Pol model pouvait s'appliquer à la plupart des cas. Cependant, au moins pour un sujet, un amortissement de type Rayleigh donne un meilleur ajustement des données, et des

coefficients satisfaisants. Cette fonction d'amortissement de Rayleigh apparaît également lors d'un essai d'un sujet du groupe 2. Ces résultats mettent en avant le besoin de construire des modèles individuels, comme suggéré par Beek *et al.* (1996).

On doit noter que contrairement aux résultats de Beek *et al.* (1996), r^2 obtenus pour l'ajustement des données de groupe sont aussi élevés que les r^2 individuels. Beek et ses collaborateurs avaient mis en évidence de grandes disparités inter-individuelles, et doutaient de ce fait que le modèle calculé à partir des données moyennées, puisse rendre compte d'un quelconque pattern individuel. Il nous semble que ce ne soit pas le cas dans l'expérimentation présente ; le modèle moyen semble représentatif de la grande majorité des comportements individuels. En fait, notre modèle moyen Duffing + Van der Pol peut être considéré comme le modèle authentique satisfaisant pour la plupart des données individuelles.

La fonction d'amortissement, dans ces modèles dynamiques, régule l'équilibre entre les pertes et les gains d'énergie. On peut donc supposer, dans le cas du simulateur de ski, que cette fonction est liée aux stratégies de forçage utilisées par les sujets pour maintenir les oscillations. Vereijken (1991) a montré que les sujets, après quelques essais de pratique, tendaient à forcer la plate-forme juste après son passage au milieu de l'appareil. En d'autres termes, ils retardaient le moment du forçage, cherchant à exploiter dans un premier temps l'énergie restaurée par les bandes élastiques, puis les complétant par un travail musculaire actif. Cette stratégie a été employée par tous les sujets de Vereijken au-delà de huit minutes de pratique cumulée. Une des conséquences de cette stratégie est que le pic de vitesse doit être atteint durant la seconde partie de la trajectoire, c'est-à-dire au-delà du point central de l'appareil. On peut noter qu'un tel biais de la trajectoire dans l'espace des phases constitue une caractéristique des oscillateurs de van der Pol (Mottet & Bootsma, 1999; voir Fig. 3-5, à gauche).

Dans la mesure où dans l'expérience de Vereijken, l'amplitude peut varier librement avec la pratique, on pourrait supposer que l'adoption de cette stratégie de forçage est liée à l'amplitude atteinte par les sujets. Au-delà d'une certaine amplitude critique, le fait de retarder l'initiation du forçage apparaît comme un comportement nécessaire : la seule solution possible pour maintenir les oscillations. De ce fait, la pertinence du modèles van der Pol pour la plupart de nos sujets ne semble pas surprenante. On peut d'ailleurs noter que les quelques

(rares) exceptions à cette règle sont apparues dans les groupes 1 et 2, et qu'à l'inverse le modèle van der Pol le plus simple (avec un seul terme non-linéaire $x\dot{x}^2$), se révèle pertinent pour l'ensemble des sujets du groupe 3 (qui faisait face au plus haut niveau de contrainte), pour l'ensemble des sessions.

Cette stratégie "commune" de forçage n'est visiblement pas adoptée par notre sujet "Rayleigh". Il doit être noté que les termes de Rayleigh et de van der Pol agissent de manière orthogonale dans l'espace des phases (le premier étant asservi à la vitesse, et le second à la position). En conséquence, un oscillateur de Rayleigh atteint son pic de vitesse dans la première partie de sa trajectoire (voir figure 3-5). On peut donc supposer que notre sujet "Rayleigh" forçait la plate forme avant son passage par le centre de l'appareil. Vereijken (1991) a mis en évidence un comportement de ce type, lors des premiers essais de ses expérimentations, lorsque les sujets oscillaient à faible amplitude. Le fait que notre sujet "Rayleigh" était confronté au plus faible niveau de contrainte d'amplitude est cohérent avec notre argumentation. Il est cependant surprenant d'observer une telle consistance, tout au long de l'expérimentation, sachant que ce comportement est a priori non optimal.

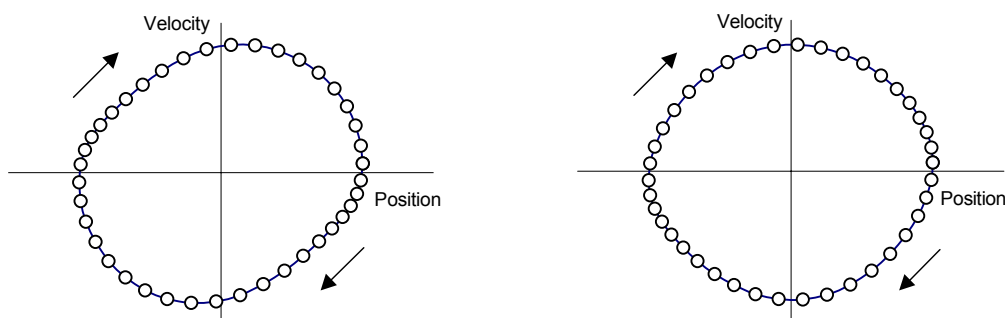


Figure 3-5: Portraits de phase typiques, pour un sujet "van der Pol" (à gauche, sujet 3.2., session 1), et le sujet "Rayleigh" (à droite, sujet 1.2., session 1). On peut noter l'asymétrie caractéristique des deux cycles limites, bien qu'elle apparaisse moins prononcée pour le sujet "Rayleigh".

La fonction de raideur, dans nos modèles, comprend deux termes non-linéaires, respectivement cubique et quintique. On pourrait supposer que cette fonction complexe de la raideur soit en rapport avec un comportement non linéaire des bandes élastiques de l'appareil. Vereijken (1991) réalise un test d'étirement des bandes de son simulateur, et montre que la relation entre le déplacement (x) et la force de rappel (F) peut être ajustée par une fonction

polynomiale de troisième ordre ($F= 410.8x - 128.58x^3$, $r^2=0.99$, F en Newtons, x en mètres; voir Vereijken, 1991, p. 64), suggérant que les bandes de l'appareil puissent être modélisées en tant que ressorts mollissants. Nous n'avons cependant pas pu répliquer ces résultats avec notre appareil: dans l'étendue des étirements utilisés dans notre expérimentation, la relation entre le déplacement et la force de rappel apparaît parfaitement linéaire ($F=1715.9x$, $r^2=0.99$). Ceci suggère que la fonction non-linéaire de raideur obtenue dans notre expérimentation ne peut s'expliquer exclusivement par les propriétés mécaniques des bandes mais plutôt par le comportement du système « sujet-appareil ». Cette suggestion est consistante avec la progressive linéarisation de la fonction de raideur avec la pratique.

Le terme cubique de signe négatif indique un ralentissement local de la fréquence d'oscillation, au voisinage de l'amplitude maximale. Mottet et Bootsma (1999) ont interprété ce type de comportement dans les tâches de Fitts comme un moyen pour accorder un peu de temps au système à l'approche de la cible, notamment lorsque la tâche était difficile, et ce tout en préservant la raideur totale du système. En ce qui concerne le simulateur de ski, cette composante mollissante pourrait être liée aux ajustements posturaux nécessaires au contrôle du revirement du mouvement. Cette interprétation est étayée par le fait que l'importance de la contribution des termes non-linéaire de raideur est liée aux contraintes d'amplitude et tend à diminuer avec la pratique. Une analyse des coordinations segmentaires serait nécessaire pour confirmer cette proposition. Cependant, la modélisation des stades d'apprentissage, proposée par Vereijken *et al.* (1997) suggère que les sujets apprennent progressivement à exploiter les forces réactives du système. Une progressive linéarisation de la fonction de raideur constitue à ce niveau un résultat attendu.

Ces résultats confirment l'idée, notamment défendue par Beek *et al.* (1995) et Mottet et Bootsma (1999), selon laquelle la raideur non-linéaire est une composante importante des mouvements biologiques (on peut rappeler à ce niveau que l'hypothèse principale de Kay et al. (1987) était la linéarité de la fonction de raideur). Une telle combinaison de termes cubique et quintique de Duffing a été étudiée en détail par Gonzales et Piro (1987), et utilisée par Schöner (1990) dans un travail visant à la modélisation dynamique des mouvements discrets. Mottet et Bootsma (1999) affirment que l'inclusion d'un terme quintique constitue une nécessité très générale dans ces équations, dans la mesure où un modèle ne contenant qu'un terme cubique, tend à diverger vers l'infini lorsque la position atteint une racine de la fonction de raideur. En incluant un terme quintique, la fonction de raideur possède un minimum local

au voisinage du point de revirement, permettant un comportement stable tant à l'intérieur qu'en dehors de l'intervalle inter-racines.

L'observation du tableau 3-1 suggère une augmentation de la contribution de l'amortissement, linéaire et non linéaire, avec l'augmentation de l'amplitude requise. Cette observation n'est pas confirmée par l'analyse de la variance réalisée sur les coefficients individuels. Néanmoins, Beek *et al.* (1995) ont reconnu que leur W-method présentait des faiblesses pour l'évaluation des composants dissipatifs, et notre estimation basée sur les données individuelles doit être considérée comme pertinente. Il faut également garder en mémoire que l'accroissement de la contribution de la fonction d'amortissement amène un renforcement de la stabilité du système (Mottet et Bootsma, 1999) : des simulations graphiques montrent clairement qu'une augmentation des coefficients des termes d'amortissement amène un cycle limite plus stable, avec un temps de relaxation plus court. Une telle tendance pourrait sous-tendre les effets observés de l'amplitude requise sur la variabilité de la fréquence.

Un point important révélé par notre expérimentation réside dans la stabilité qualitative des modèles individuels au travers des sessions de pratique. En général, un seul modèle rend compte de la dynamique individuelle, de la première à la dernière session. La pratique amène des modifications quantitatives des coefficients du modèle mais celui-ci reste inchangé au niveau qualitatif. Ceci suggérerait que la pratique, du moins dans la fenêtre explorée dans notre expérimentation, entraîne davantage des changements progressifs dans les coordinations que des transitions abruptes. Cette conclusion n'est pas en accord avec les observations de Vereijken *et al.* (1997) qui rendent compte d'une succession d'étapes qualitativement distinctes, caractérisées par des modèles mécaniques différents. On peut noter cependant que nos sujets, bien que naïfs sur le simulateur, ont pu bénéficier de leurs expériences précédentes en ski. Ils se sont révélés capables d'atteindre dès le premier essai les amplitudes requises, même pour les groupes 2 (22.5 cm) et 3 (30 cm), alors que les amplitudes initiales rapportées par Vereijken (1991) étaient aux alentours de 10 cm. Ceci nous amène à penser que nos sujets au début de l'expérimentation se situaient au-delà de la première étape identifiée par Vereijken.

Nous avons tout de même relevé deux exceptions quant à cette stabilité qualitative des modèles individuels: (i) le sujet 2.2. présente dans la session 3 une transition momentanée du modèle van der Pol au modèle Rayleigh, et (ii) le sujet 1.5. présente un modèle de van der Pol à un terme à la dernière session (équation 3) alors que pour les trois premières sessions un

modèle de van der Pol d'ordre 4 était plus pertinent (équation 4). Il semblerait que le changement final dans les termes du modèle pour le sujet 1.5. soit une évolution logique due à la pratique, dans la mesure où l'équation 3 correspond au modèle le plus communément exploité, tant au niveau individuel qu'à celui des données moyennées. La transition du sujet 2.2. est plus difficile à interpréter. Les analyses plus approfondies, prenant en compte la totalité des données de cette session, pourraient indiquer s'il s'agit d'une stratégie délibérée (l'exploration active d'une solution alternative), ou un artefact accidentel

3-6- Conclusion

D'un point de vue méthodologique, nous pouvons avancer que des méthodes graphiques et numériques proposées par Beek et Beek (1988), constituent des outils valables de la construction de modèles dynamiques rendant compte des mouvements cycliques. L'utilisation des cycles moyennés normalisés permet d'éliminer le bruit des données expérimentales, et autorise la construction de modèles valides d'un point de vue qualitatif (stabilité, contraintes de signes) et quantitatifs (précision de l'ajustement). Tout comme Mottet et Bootsma (1999), nous soulignons la nécessité de sélectionner au préalable des termes pertinents avant l'application de la W-method. Nos résultats confirment également la difficulté d'obtenir des coefficients d'amortissement fiables à partir des données de l'espace des phase. Ceci paraît particulièrement important en ce qui concerne les modélisations des données individuelles, et demanderait des considérations méthodologiques plus approfondies.

Plus généralement, nos résultats confirment deux points importants, rejoignant en cela les conclusions de Beek *et al.* (1996): (i) l'importance de la non-linéarité de la raideur, dans les mouvements biologiques, et (ii) la nécessité de construire des modèles individualisés pour rendre compte des différences inter-individuelles dans les patterns cinématiques.

Ces modèles dynamiques offrent une description très riche des mouvements rythmiques. Nos résultats mettent l'accent sur le rôle des contraintes de la tâche, qui semblent déterminer la nature du modèle, ainsi que l'importance de la contribution de chaque terme. De plus, nos résultats suggèrent que la pratique entraîne une évolution progressive de la dynamique du mouvement, principalement caractérisée par linéarisation graduelle du modèle.

Cependant, ce travail ne visait pas à étudier le processus d'apprentissage dans sa totalité. Ainsi, l'élaboration d'expérimentations de plus longue durée serait nécessaire pour évaluer la capacité de tels modèles à rendre compte des changements qualitatifs qui ponctuent

l'apprentissage d'une nouvelle habileté (i.e. les transitions de phase). De tels modèles pourraient ainsi constituer des variables collectives pertinentes pour l'étude de l'acquisition des habiletés complexes.

Pour finir, il nous semble nécessaire de préciser que notre objectif n'est pas de nous restreindre à l'identification des équations mathématiques pour rendre compte de nos données expérimentales. Les modèles que nous construisons possèdent des propriétés dynamiques comme la stabilité et les comportements de bifurcation. Ces outils nous semblent être performants pour répondre à nos hypothèses de base selon lesquelles un système exploite de telles propriétés pour produire un mouvement rythmique.

Un dernier commentaire pour répondre à une question fondamentale: « Ce type de modélisation, représente-t-il autre chose qu'une forme particulièrement sophistiquée d'ajustement? » « Permet-il d'approfondir notre connaissance sur la manière dont les mouvements sont appris et contrôlés? » Notre but ne peut être réduit à la découverte des équations mathématiques qui rendent compte au mieux de nos données expérimentales. La catégorie des modèles que nous tentons de construire, possède des propriétés dynamiques, telles que la stabilité et les comportements de bifurcation (Gonzalez & Piro, 1987; Mottet & Bootsma, 1999). L'hypothèse de base de cette approche est que le système *exploite* ces propriétés (notamment de cycle limite) pour produire des mouvements rythmique. Notre but est moins de décrire le mouvement que d'identifier l'attracteur qui le sous-tend. Et la démonstration que cet attracteur demeure qualitativement inchangé durant cinq sessions de pratique va clairement au-delà d'un simple ajustement de données.

Forts de ces premiers résultats, nous nous proposons pour la suite, d'étudier l'évolutions des différents patterns de coordinations rencontrés lors de l'apprentissage d'une habileté cyclique complexe. Pour ce faire nous nous proposons d'utiliser, à nouveau les outils mathématiques de modélisation ainsi que d'autres outils comme la variable collective de décalage de phase. Il serait sûrement intéressant de mettre en relation la présence de différents modèles avec des stratégies de forçage elles aussi différenciées.

CHAPITRE IV : Etude longitudinale de l'acquisition d'une habileté complexe : modélisation et stratégies de forçage pour les oscillations au simulateur de ski modifié

4-1- Introduction

L'apprentissage moteur a été longtemps conçu comme un processus d'affinement progressif et continu. Cette idée a notamment été portée par les théories cognitivistes: au cours de l'apprentissage, le sujet construit une représentation interne de la réponse, et affine progressivement cette représentation sur la base de la connaissance des résultats et/ou de la présentation de la réponse critère. Cette conception du processus d'apprentissage trouve sa plus claire illustration dans le modèle classique de la loi puissance : l'évolution moyenne des performances a été fréquemment modélisée comme une fonction puissance, du temps ou du nombre d'essais réalisés. Newell (1991) critique sévèrement ces conceptions. Selon lui, l'apprentissage est essentiellement discontinu, non-linéaire. Selon lui, l'apprentissage est essentiellement discontinu, non-linéaire. Il est marqué par des réorganisations qualitatives profondes du comportement. Zanone et Kelso (1992) présentent une conception de l'apprentissage reposant également sur la discontinuité : l'apprentissage consiste pour ces auteurs en une transition de phase, entre un premier type de comportement correspondant à un attracteur intrinsèque du système, c'est-à-dire à un mode de coordination spontané, et un second type de comportement correspondant au pattern à apprendre. Ces conceptions discontinues de l'apprentissage ont été récemment confortées par certains travaux qui ont révélé des différences qualitatives importantes entre novices et experts, suggérant l'existence de transitions de phase au cours de l'apprentissage. C'est le cas de l'expérimentation de Temprado, Della-Graa, Farrell & Laurent (1997).sur le service en volley-ball. Delignières *et al.*(1998) on produit un résultat similaire dans une étude portant sur la bascule aux barres parallèles. Ce travail montre en outre que les coordinations spontanées offre une importante résistance au changement : après 80 essais sur la tâche, la transition n'est toujours pas observée. En fait, aucune expérimentation n'a permis d'observer *on line* cette transition ; on dispose de peu de données susceptibles d'éclairer la manière dont elle peut se produire.

Selon Newell (1991), les descriptions continues ne constituent que des artefacts, liés (i) à la simplicité des tâches expérimentales (limitées le plus souvent à un seul degré de liberté), (ii) à la brièveté de l'étude et (iii) à la nature strictement chronométrique des variables

dépendantes utilisées pour rendre compte de la performance. On trouve cependant peu d'expérimentations dans la littérature susceptibles de satisfaire simultanément à ces trois objections.

C'est ce que nous avons tenté de faire dans la présente expérimentation. Notre objectif était 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 présentée ici, était d'analyser l'évolution du comportement dans une tâche complexe (le simulateur de ski), sur un terme suffisamment long (13 semaines de pratique). Nos analyses portent d'une part, sur la modélisation de la dynamique du déplacement de la plate-forme du simulateur.

Dans le travail présenté précédemment, nous n'avons pas pu mettre en évidence de modification qualitative majeure au cours de quatre sessions successives de pratique : les sujets impliqués dans l'expérimentation exploitaient une fonction d'amortissement de type *van der Pol*, et ce comportement ne semblait pas s'altérer par la pratique. La seule évolution notable résidait en une linéarisation progressive de la fonction de raideur. Lors des premiers essais, elle était caractérisée par une fonction de *Duffing* fortement non-linéaire puis elle perdait progressivement de l'importance au fur et à mesure des sessions. Nous faisons l'hypothèse qu'avec une durée plus longue de pratique, les sujets doivent bifurquer vers un autre type de comportement, exploitant de manière plus efficiente les propriétés de l'appareil.

Afin d'être assuré que nos sujets étaient réellement débutants, le simulateur de ski a été modifié en mono-ski.

Comme nous l'avons déjà précisé, Vereijken et ses collaborateurs (1991, 1997) ont pu observer que les sujets apprenaient progressivement à exploiter les forces réactives du système. Les sujets utilisent donc des stratégies de forçage de la plate-forme qui sont différenciées durant l'apprentissage. Arrêtons-nous quelque peu sur la notion de forçage. Bergé *et al.* (1994) donnent une définition du forçage. Ils précisent que les frottements d'un système en mouvement permanent, rend inévitable l'entretien du mouvement. Il est donc nécessaire d'apporter l'énergie afin de garder la stabilité du mouvement. 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. Ils précisent de plus que « beaucoup de comportements qui résultent de ce forçage sont d'une grande richesse ».

Vereijken(1991) et Vereijken *et al.* (1992) ont donc montré, qu'après des premiers essais assez chaotiques, les sujets parvenaient à détecter au fur et à mesure de la pratique, les caractéristiques de l'appareil. Ainsi l'on pouvait constater au bout de quelques essais, une stabilisation du forçage du système, avant le passage au milieu du simulateur de ski . Par contre, en fin d'apprentissage, les sujets exploitaient les forces réactives de l'appareil se concrétisant par une poussée sur la plate-forme après le centre du simulateur de ski. On constate donc deux types de forçage stabilisé durant l'apprentissage.

Nous nous proposons donc, de décrire en terme de décalage de phase entre les oscillations de la plate-forme et celle du centre de gravité du sujet, les coordinations spécifiques lors de l'apprentissage des oscillations au simulateur de mono-ski et nous faisons l'hypothèse qu'à chacun des comportements observés en terme de modèles mathématique, correspondra une stratégie de forçage différente et donc des valeurs de décalages de phases distinctes.

4-2- Méthode

4-2-1- Sujets

Cinq sujets dont quatre hommes et une femme, d'âge moyen 29.2 ans (s.d. : 6.3), de poids moyen 71.6kg (s.d. :4.5)et de taille moyenne 179.6cm (s.d. :3.57)ont participé à cette expérimentation. Tous faisant partie de la Faculté des Sciences du Sport de Montpellier et ont participé volontairement et sans rémunération à cette expérimentation. Quatre d'entre eux étaient des skieurs occasionnels, un seul était totalement débutant à ski. Aucun n'avait cependant eu d'expérience préalable sur l'appareil proposé.

4-2-2- Dispositif expérimental

La tâche a été réalisée sur un simulateur de ski de marque Skier's Edge, qui a été décrit précédemment (voir chapitre II ; partie 2-1). Pour les raisons que nous avons évoquées dans l'introduction de ce chapitre, nous avons modifié l'appareil pour rendre la tâche plus difficile. Alors que dans la version commerciale, le chariot était équipé de deux supports articulés et indépendants pour chacun des pieds, nous les avons remplacés par un plateau unique, de 30

cm de large, articulé sur un axe central à rotation frontale (Figure XX). Les sujets devaient poser les deux pieds sur ce plateau, de part et d'autre de l'axe de rotation. Afin de permettre aux sujets de descendre de l'appareil en cas de déséquilibre, les pieds n'étaient pas fixés au plateau. Cependant ce dernier était équipé de deux rebords latéraux, qui évitaient que les pieds glissent vers l'extérieur. Enfin, les déplacements du plateau autour de son axe de rotation étaient amortis par deux coussinets de mousse dense, fixés à droite et à gauche sur le chariot. Cette transformation en mono-ski visait à s'assurer que les sujets étaient réellement débutants en début d'expérimentation.

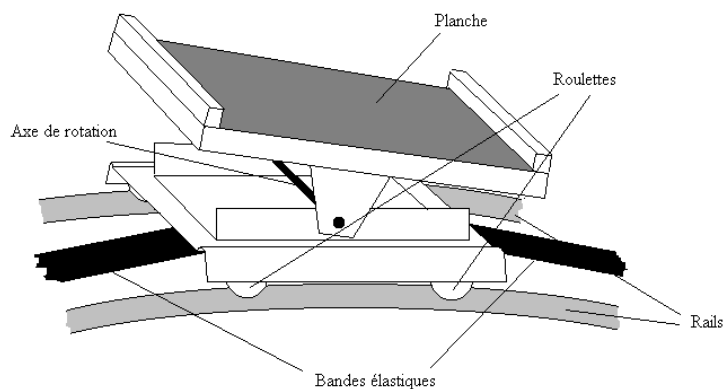


Figure 4-1: Détail de l'adaptation de la plate-forme en mono-ski.

4-4-3- Protocole

La consigne donnée aux sujets était d'apprendre à réaliser sur le simulateur des oscillations les plus amples et les plus fréquentes 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.

Chaque séance de travail était composée de dix essais d'une minute, entrecoupés d'une minute de récupération. L'expérience a été menée à raison de deux à trois séances par semaine, durant 13 semaines, soit en tout 39 séances de travail, totalisant 390 essais de une minute.

Il était difficilement envisageable de traiter l'ensemble des essais réalisés. Suivant le principe avancé par Vereijken (1991), et faisant l'hypothèse que c'est lors des premières semaines que les principaux changements comportementaux allaient survenir, le recueil des

données a été concentré au début de l'expérimentation, puis de plus en plus ponctuel au fur et à mesure de l'avancée du protocole. Plus précisément, de la séance 1 à la séance 6 (c'est-à-dire tout au long des deux premières semaines), l'ensemble des essais a été enregistré. Lors de la troisième semaine (séances 7 à 9), seuls les essais 1, 5 et 10 donnaient lieu à enregistrement. Au cours des semaines 4 et 5, les enregistrements étaient réalisés durant la dernière séance de la semaine (séances 12 et 15), essais 1, 5 et 10. Au-delà, seul le cinquième essai de la dernière séance de chaque semaine était traité (séances 18, 21, 24, 27, 30,33,36 et 39).

Lors des essais sélectionnés, nous avons procédé à deux types de recueil de données.

Le premier, d'une part, consistait en l'enregistrement de la position du chariot en continu, au moyen d'un potentiomètre, à une fréquence d'acquisition de 100 Hz (de la 15^{ème} à la 45^{ème} seconde) Pour les traitements présentés, nous n'avons retenu que les 20 premières secondes, soit les 2000 premières données de chaque échantillon.

Le deuxième, d'autre part, consistait en l'enregistrement de l'évolution des principales articulations corporelles et des différents éléments de l'appareil, par un système d'analyse d'image en trois dimensions VICON 370[®] de Biometrics (U.K.), à une fréquence de 50Hz. Les sujets et le simulateur de mono-ski étaient équipés de marqueurs réfléchissant d'un centimètre de diamètre (Figure 4-2), situés en position frontale, comme suit :

Marqueur n°1 : tête(entre les deux yeux)

Marqueur n°2 : articulation gléno-humérale de la partie gauche du corps

Marqueur n°3 : articulation gléno-humérale de la partie droite du corps

Marqueur n°4 : le grand trochanter de gauche

Marqueur n°5 : le grand trochanter droite

Marqueur n°6 : le plateau tibial gauche

Marqueur n°7 : le plateau tibial droit

Marqueur n°8 : la malléole externe gauche

Marqueur n°9 : la malléole externe droite

Marqueur n°10 : extrémité du pied gauche

Marqueur n°11 : extrémité du pied droit

Marqueur n°12 : extrémité du côté gauche du plateau

Marqueur n°13 : extrémité du côté droit du plateau

Marqueur n°14 : point central du chariot

Marqueur n°15 : centre du simulateur de ski.

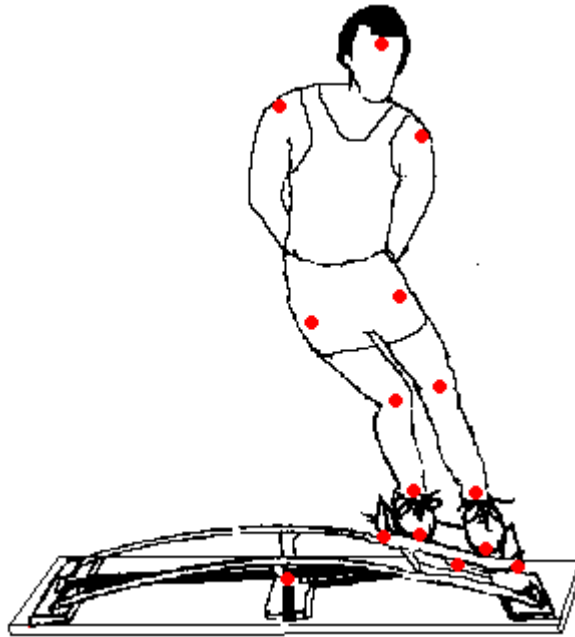


Figure4-2 : Positionnement des marqueurs réfléchissants sur les principales articulations corporelles et les différents éléments sur simulateur de « mono-ski »

Pour le traitement, nous avons conservé la totalité des quinze secondes enregistrées (de la 25^{ème} à la 40^{ème} seconde) de chaque essais retenus.

4-4-4- Réduction des données

Nous avons procédé à deux traitements parallèles pour les données recueillies par le potentiomètre et celles recueillies par le système d'analyse d'image.

Les données du potentiomètre : l'évolution de la plate-forme

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: (i) 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 (ii) la fréquence moyenne (en Hz), définie comme la moyenne des inverses des périodes.

Puis ces séries ont été modélisées selon la méthode présentée dans le chapitre précédent, adaptée de la *W-method* de Beek et Beek (1988). Rappelons que cette méthode inclut les étapes suivantes:

- (1) Construction d'un cycle moyen normalisé en 42 points, représentant la dynamique de l'attracteur du système.
- (2) Identification, par des procédures graphiques, des termes à inclure dans les fonctions de raideur et d'amortissement de l'équation de mouvement
- (3) Estimation, par une procédure de régression multiple, des coefficients de chacun de ces termes.

Les données du système d'analyse d'image : l'évolution des différents éléments de l'appareil et des articulations principales des sujets.

Nous avons calculé le centre de gravité selon la méthode de Winter (1990). Nous avons tout d'abord calculés les centre de gravité des jambes et des pieds, des cuisses, puis des membres inférieurs, du tronc et de la tête et des membres supérieurs, en suivant la même procédure que celle développée dans le premier chapitre (Chapitre I ; partie 1-1-4).

Puis, nous avons procédé au calcul du décalage de phase entre la phase des oscillations verticale du centre de gravité et la phase des oscillations horizontales du déplacement de la plate-forme, en suivant plusieurs étapes.

→ *Calcul de la hauteur du centre de gravité*

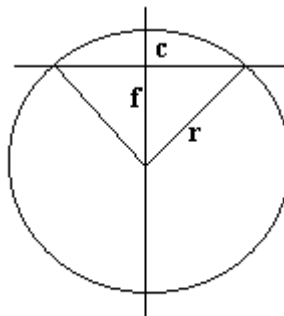
Les données en trois dimensions du chariot et du centre de gravité ont tout d'abord été lissée par une moyenne mobile en 5 points.

$$H_{cg} = \sqrt{(x_{cg} - x_{ch})^2 + (y_{cg} - y_{ch})^2 + (z_{cg} - z_{ch})^2}$$

Où, H_{cg} correspond à la hauteur du centre de gravité, cg au centre de gravité et ch à la plate-forme

→ *Calcul de l'angle du déplacement de la plate-forme*

Nous avons calculé, le rayon de la corde constitué par le déplacement du chariot sur les rails, à partir des données en x des marqueurs n°14 et n°15 (1) puis le calcul des coordonnées du chariot (2) et enfin l'angle du déplacement (3)



$$\text{Où : } \quad r = \frac{f}{2} + \frac{c^2}{8f} \quad \quad c = 2r \sin \frac{2\theta}{2} \quad (1)$$

$$f = \left(1 - \cos \frac{2\theta}{2}\right) = \frac{c}{2} \operatorname{tg} \frac{2\theta}{4} \quad (2)$$

$$\alpha_p = \operatorname{asin} \left(\frac{x_{\text{chariot relatif}}}{f} \right) \quad (3)$$

→ Filtrage et réétalonnage de la hauteur du centre de gravité(Hcg) et de l'angle du déplacement de la plate-forme(αp) :

Nous avons filtré Hcg et αp par une Fast Fourier Transform à une fréquence de coupure de 10 Hz. Nous avons étalonné leur position et leur vitesse entre [+1 ; -1].

→ Calcul des phases de Hcg et αp :

Nous avons calculé les phases grâce à l'équation suivante :

$$\varphi_{1,2} = \arctangeante\left(\frac{\dot{x}}{x}\right) * \frac{180}{\pi}$$

Où : (φ_1) la phase des oscillations du déplacement de la plate-forme

(φ_2) la phase des oscillation du centre de gravité

→ Calcul du décalage de phase

A partir des séries temporelles des phases, nous avons relevé la valeur de la phase de la plate-forme(φ_1) lorsque la valeur de la phase du centre de gravité(φ_2) était minimale. Cette valeur correspond à la situation de la plate-forme lorsque le sujet exerce son forçage. Nous avons donc retenu deux valeurs de décalage de phase, l'une pour le déplacement vers la droite et l'autre pour le déplacement vers la gauche.

Nos variables retenues sont les décalages de phase moyens en déplacement vers la droite et vers la gauche avec leur écart type respectif. Nous faisons l'hypothèse que les différents type de modèle que nous devrions constater tout au long de l'apprentissage, correspondent à des types de forçage eux aussi différents. De ce fait nous ne prendrons en compte que des valeurs de décalage de phase moyen typiques d'une période correspondant à un type particulier de modèle.

4-5- Résultats

4-5-1-Résultats de la modélisation du déplacement de la plate-forme

L'évolution de l'amplitude des oscillations, au cours de l'expérimentation, est reportée en Figure 4-3. Comme on peut le constater, l'amplitude est assez faible lors des

premiers essais (entre 5 et 10 cm, sauf pour le sujet 1 qui d'emblée est à 20 cm). Cependant, au cours de la première semaine (de l'essai 1 à l'essai 30), tous les sujets vont parvenir à une amplitude au moins égale à 30 cm. Les progrès sont ensuite limités.

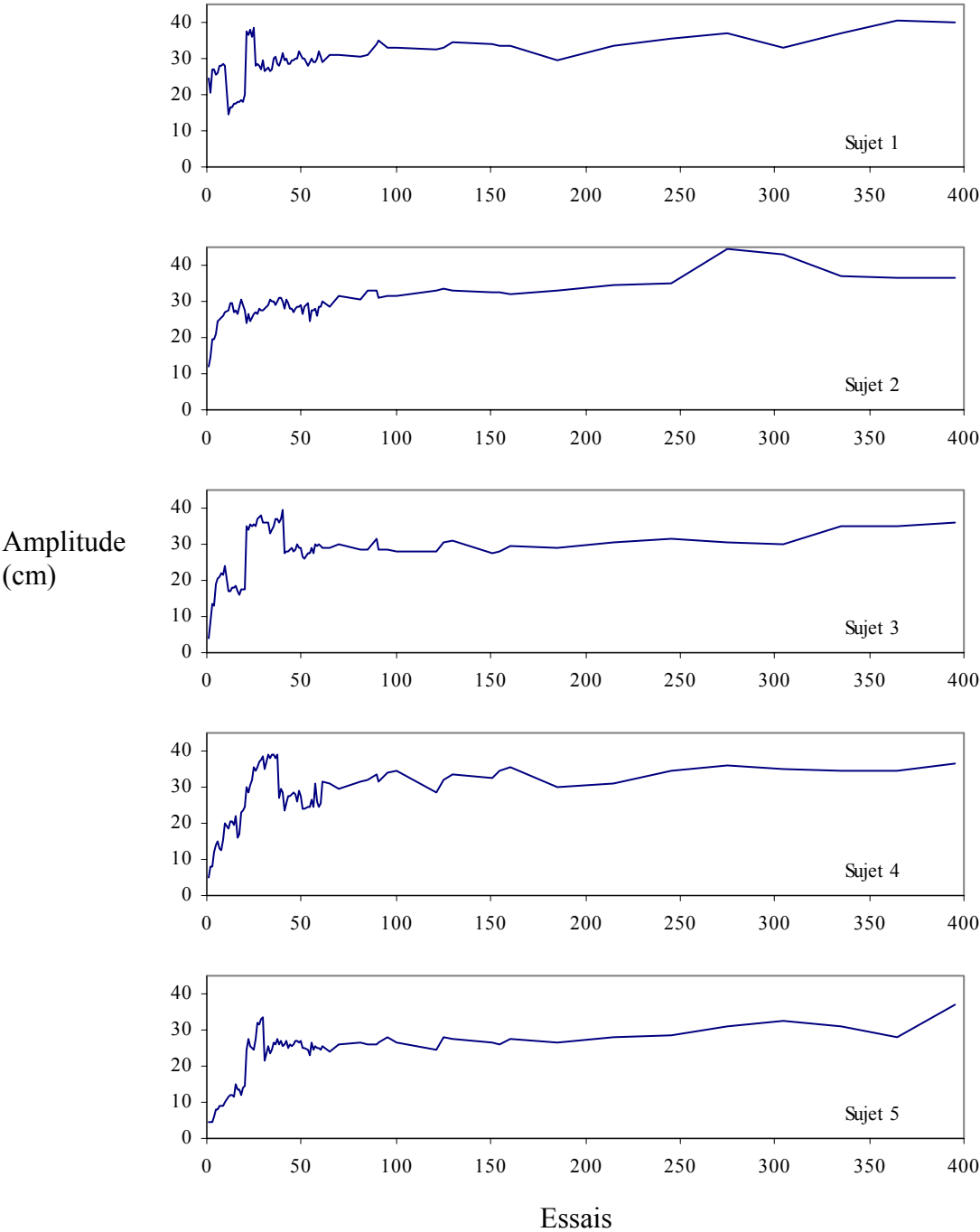


Figure 4-3: Séries temporelles individuelles de l'amplitude des oscillations.

L'évolution de la fréquence est illustrée en figure 4-4. On peut remarquer que d'une manière générale, les sujets adoptent dans les premières semaines de l'expérimentation une fréquence voisine de 1 Hz. On assiste ensuite à un accroissement de la fréquence, vers

une valeur proche de 1.4 Hz. Chez les sujets 2, 4 et 5, cet accroissement apparaît de manière brutale. Il est plus progressif chez le sujet 1. En revanche, le sujet 3 présente une évolution tout-à-fait particulière : sa fréquence reste tout au long de l'expérimentation au voisinage de 1.2 Hz.

Quelques particularités individuelles méritent encore d'être notées: le sujet 2 notamment, produit lors du premier essai une fréquence très élevée de 1.76 Hz.. Cette fréquence va ensuite diminuer régulièrement, au cours des deux premières séances, pour s'établir de manière durable autour de 1 Hz. On peut relever quelques "accidents" lors de trois premiers essais: des fréquences élevées pour le sujet 3, des fréquences à l'inverse très faibles pour les sujets 4 et 5. Mais ces trois sujets semblent avoir stabilisé, au terme de la première séance, leur fréquence aux environs de 1Hz.

A partir des coefficients de détermination de la régression de la position sur l'accélération, on peut déterminer la contribution relative des termes non-linéaires, au travers de la quantité $1-r^2$ (voir partie précédente). La figure 4-5 reproduit l'évolution de cette contribution au fil de l'expérimentation. D'une manière générale, on peut dire que la contribution des termes non-linéaires tend à diminuer avec l'apprentissage, et n'est plus guère significative au-delà du 100^{ème} essai, pour l'ensemble des sujets.

Cette évolution présente cependant des cinétiques individuelles différentes. La contribution des termes non-linéaires est assez faible, même en tout début d'expérimentation, chez les sujets 1 et 3. Elle est beaucoup plus importante pour les sujets 4 et 5 (plus de 60% de variance expliquée), mais s'estompe dans des délais à peu près similaires. L'évolution pour le sujet 2 est assez surprenante: alors que les deux premières semaines sont caractérisées par une forte linéarité (avec un $1-r^2$ moyen de 0.06), on assiste à un brusque accroissement de la contribution des termes non-linéaires à partir de la troisième séances, qui ne retrouvera les valeurs initiales que vers la neuvième séance.

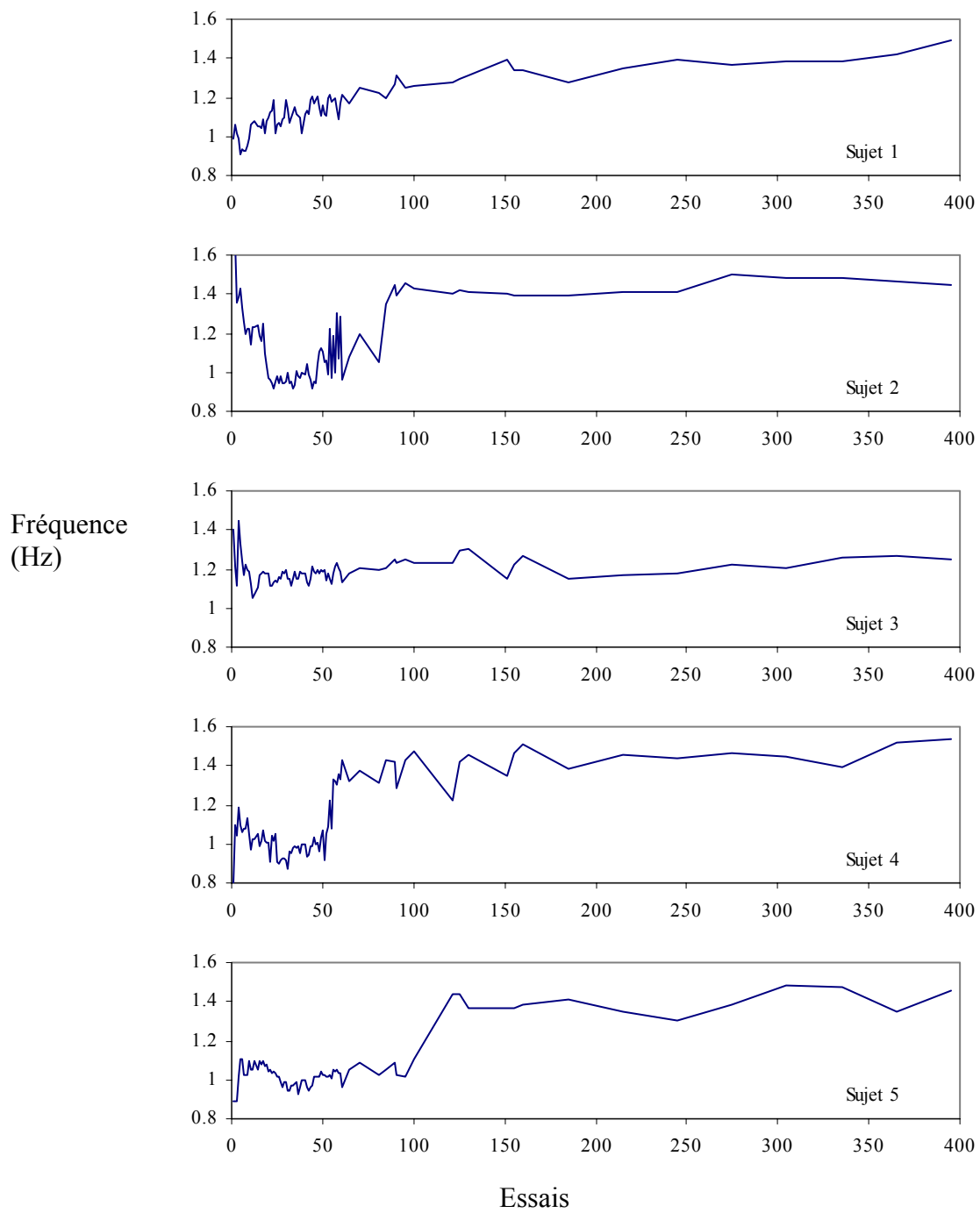


Figure 4-4: Séries temporelles individuelles de la fréquence des oscillations.

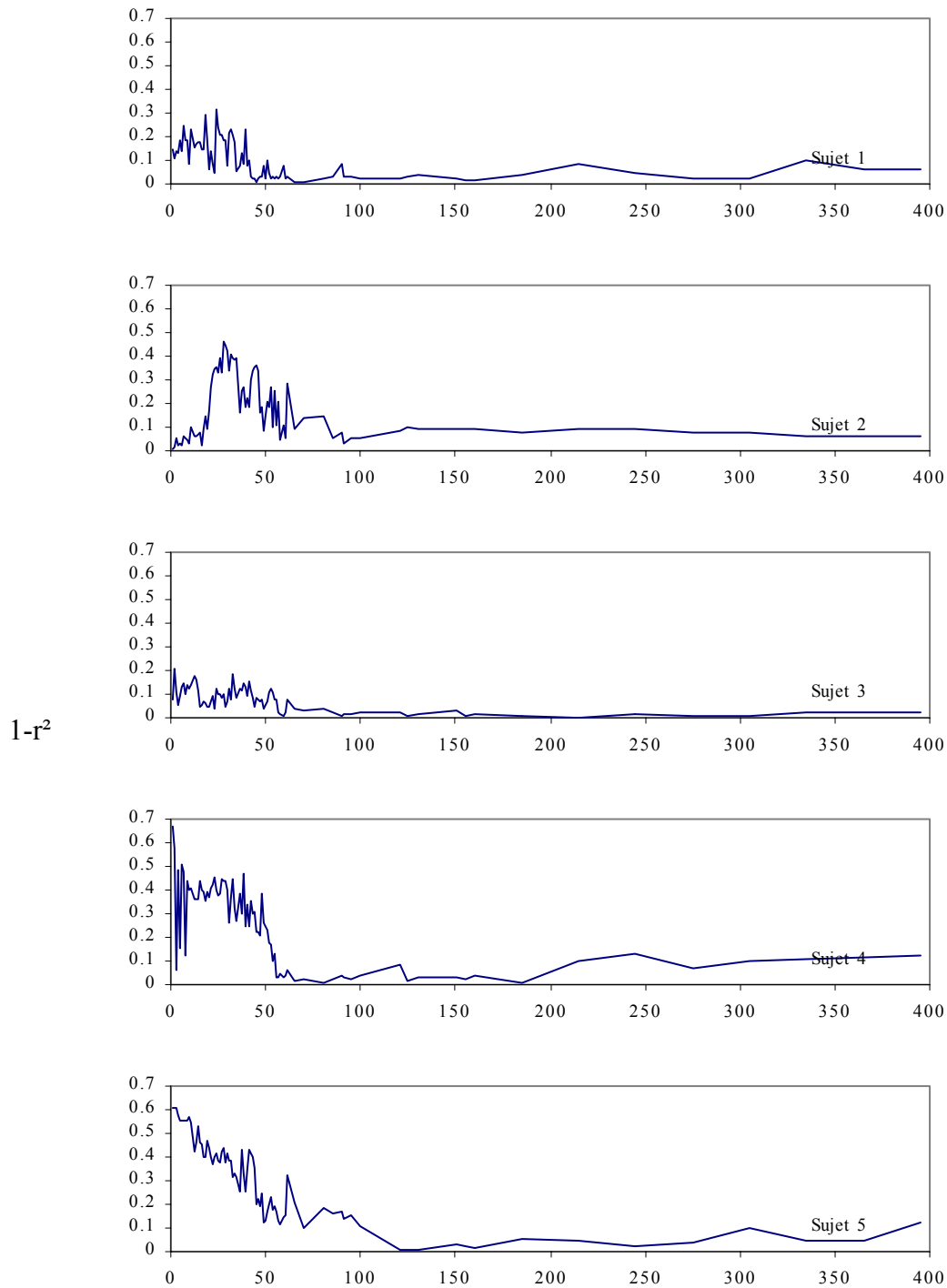


Figure 4-5: Séries temporelles individuelles de la grandeur $1-r^2$, rendant compte de la contribution des termes non-linéaires dans le modèle.

La modélisation nous permet de rentrer davantage dans le détail de ces évolutions. L'examen des portraits de Hooke indique d'une manière générale que la raideur du système est non-linéaire, et suggère l'introduction dans le modèle pour l'ensemble des essais, d'un terme de Duffing en x^3 , négatif, et d'un terme en x^5 , positif. En ce qui concerne l'amortissement, deux types de fonctions ont été mis en évidence au cours de l'expérimentation: certains essais

sont caractérisés par un amortissement de type Rayleigh (avec un terme non-linéaire en \dot{x}^3), d'autres par un amortissement de type van der Pol d'ordre 2 (avec un terme non linéaire en $x^2\dot{x}$).

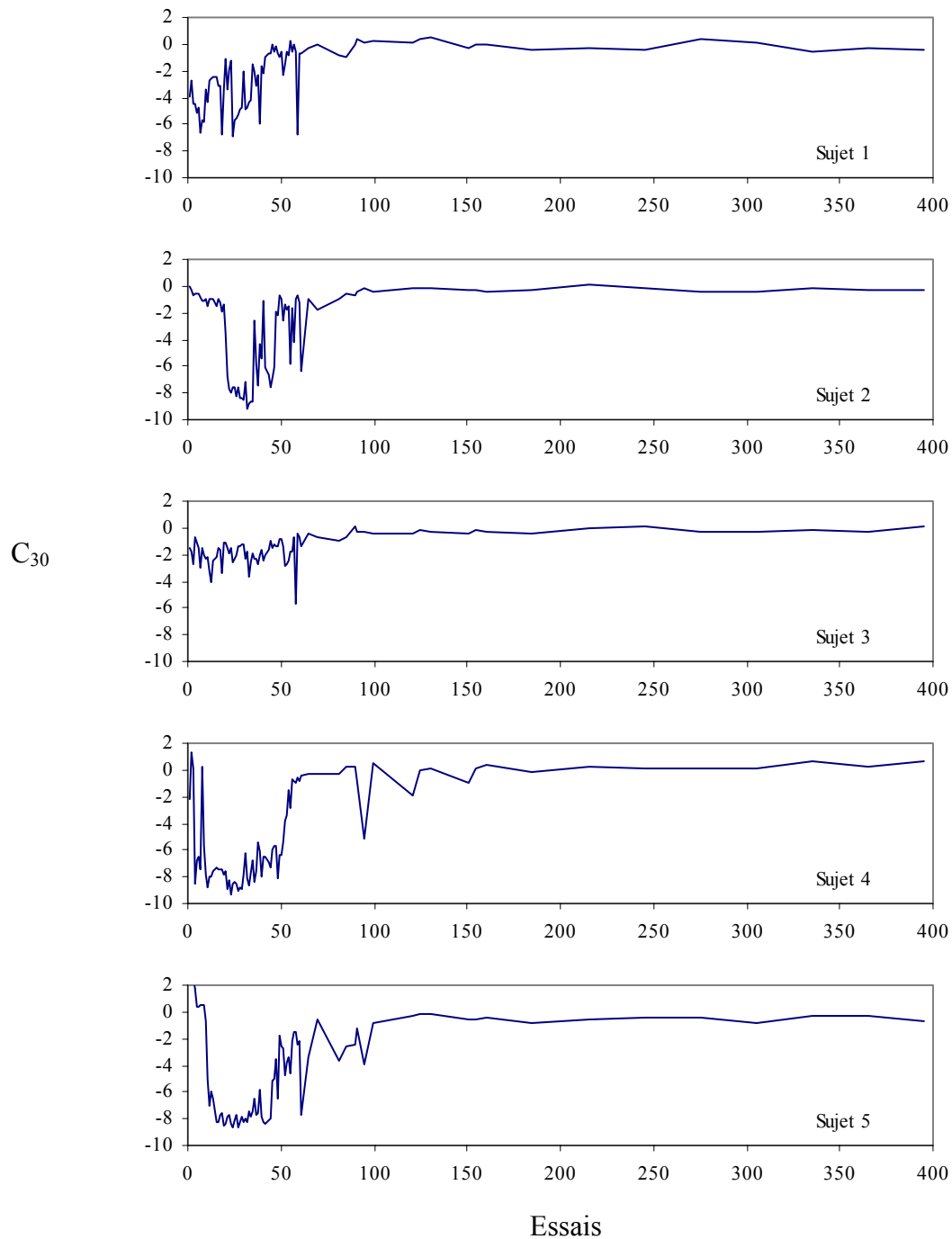


Figure 4-6: Séries temporelles individuelles du coefficient de raideur c_{30} .

L'association de ces fonctions de raideur et d'amortissement débouche sur deux modèles possibles, le modèle "Rayleigh":

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{03}\dot{x}^3 = 0 \quad (4)$$

et le modèle "van der Pol":

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

Les coefficients de la fonction de raideur (c_{10} , c_{30} et c_{50}) évoluent de manière parallèle au cours de l'expérimentation. Nous avons représenté à titre d'exemple en figure 4-6 les séries temporelles individuelles du coefficient c_{30} . Durant les premières sessions ces coefficients présentent des valeurs absolues élevées (c_{10} , et c_{50} étant positifs, et c_{30} négatif). Dans un deuxième temps, c_{10} se stabilise sur des valeurs proches de 1, alors que c_{30} et c_{50} rejoignent des valeurs voisines de 0. La pratique semble donc induire une linéarisation de la fonction de raideur, effective pour l'ensemble des sujets entre le 50^{ème} et le 100^{ème} essai.

On peut à nouveau relever certaines particularités individuelles : les termes de raideur non-linéaire, chez le sujet 3 n'ont qu'une influence restreinte dans la dynamique du modèle. Cette influence est beaucoup plus marquée chez les autres sujets, mais ne s'installe réellement qu'à la seconde séance pour les sujets 4 et 5, et à la troisième séance pour le sujet 2.

En ce qui concerne les fonctions d'amortissement, les résultats de la modélisation montrent que les 5 sujets, dès le début de l'expérimentation ou après quelques essais "chaotiques", adoptent et exploitent de manière relativement stable un comportement de type Rayleigh. On peut noter cependant que le sujet 2 réalise deux sessions complètes en exploitant une fonction d'amortissement de type Van der Pol, mais revient dès le début de la troisième session sur un modèle Rayleigh.

Au cours de l'expérimentation, tous les sujets transitent de manière plus ou moins brusque vers un comportement d'amortissement de type van der Pol. Cette transition apparaît dès la septième séance pour le sujet 2, mais pas avant la 21^{ème} pour le sujet 3.

Afin d'illustrer cette transition, nous avons calculé pour l'ensemble des essais le coefficient $C_{01(\text{Rayleigh})}$ obtenu lors de l'ajustement d'un modèle Rayleigh (équation 4) au cycle moyen normalisé. On sait que pour produire un cycle limite, le coefficient d'amortissement linéaire (C_{01}) doit être négatif, et le coefficient d'amortissement non linéaire (C_{03} ou C_{21}) positif. Lorsque le coefficient $C_{01(\text{Rayleigh})}$ est négatif, le modèle Rayleigh est stable. Par contre lorsque ce coefficient est positif, le modèle Rayleigh est incapable de générer un cycle limite et diverge rapidement vers l'infini. Dans ce cas un modèle comprenant une fonction d'amortissement de type van der Pol s'avère pertinent.

L'évolution des valeurs de $C_{01(\text{Rayleigh})}$ est décrite pour chaque sujet en figure 4-7. On aura compris que ce calcul de $C_{01(\text{Rayleigh})}$ n'a qu'un but illustratif, visant à présenter dans une métrique unique des comportements qualitativement différents. Les coefficients supérieurs à zéro n'ont guère de sens ; les modèles Rayleigh correspondant étant essentiellement instables. Cependant, les fonctions d'amortissement de Rayleigh et de van der Pol agissant de manière orthogonale dans l'espace des phases, le fait de forcer un ajustement Rayleigh sur des données plutôt caractérisées par une fonction van der Pol tend à inverser le signe de l'amortissement linéaire. Ceci n'en affecte que modérément la valeur absolue. On trouve de ce fait des corrélations significatives, et logiquement négatives, entre les coefficients C_{01} obtenus d'une part à partir de l'ajustement du modèle "Rayleigh" et d'autre part à partir de l'ajustement du modèle "van der Pol" (sujet 1: -.92; sujet 2: -.93; sujet 3: -.84; sujet 4: -.69; sujet 5: -.62). De ce fait, les valeurs positives obtenues pour $C_{01(\text{Rayleigh})}$ dans la seconde partie de l'expérimentation constituent un bon indicateur de la stabilité de l'oscillateur de van der Pol correspondant.

L'examen de la figure 4-7 indique qu'à partir de la seconde séance (essais 11-20), les sujets stabilisent une fonction d'amortissement de type Rayleigh, avec des coefficients C_{01} situés entre -1 et -1.5 . Ces coefficients tendent ensuite à diminuer, en valeur absolue, traduisant une perte de stabilité de l'attracteur. Au terme d'une phase de transition au cours de laquelle le coefficient $C_{01(\text{Rayleigh})}$ oscille entre des valeurs faiblement positives et faiblement négatives, on observe une stabilisation sur des valeurs positives, au voisinage de 1.

Le rapprochement de cette figure des deux précédentes suggère enfin que la linéarisation de la fonction de raideur (Figure 4-6), et l'accroissement de la fréquence (Figure 4-4) semblent précéder la bifurcation vers l'amortissement de type van der Pol.

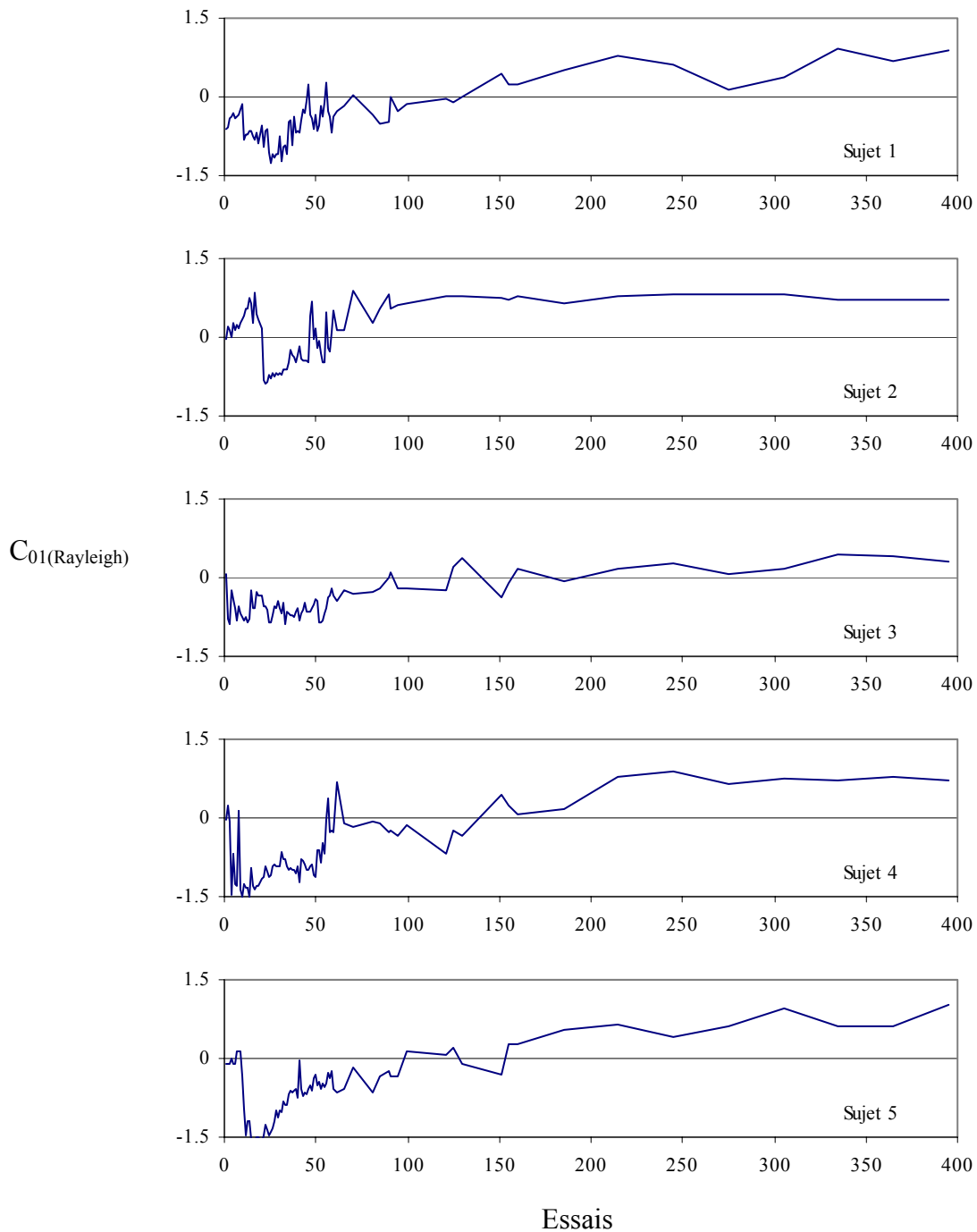


Figure 4-7 : Séries des coefficients d'amortissement linéaire obtenus lors de l'estimation d'un modèle "Rayleigh". Lorsque ce coefficient est négatif, le modèle de Rayleigh est stable. Lorsqu'il est positif, les données peuvent généralement être ajustées sur un modèle de type van der Pol. La bifurcation apparaît donc au moment où la courbe passe des valeurs positives aux valeurs négatives.

La phase de transition est souvent assez longue (voir sujets 3, 4 et 5). Les coefficients d'amortissement, durant ces phases, sont en général très faibles. L'examen des portraits de Hooke (position vs accélération, Figure 4-8) montre que si lors des premiers essais et des derniers, on retrouve les dissymétries caractéristiques des comportements d'amortissement de Rayleigh (figure de gauche) ou de van der Pol (figure de droite), les essais de transition ne révèlent plus guère de dissymétrie entre les deux demi-cycles.

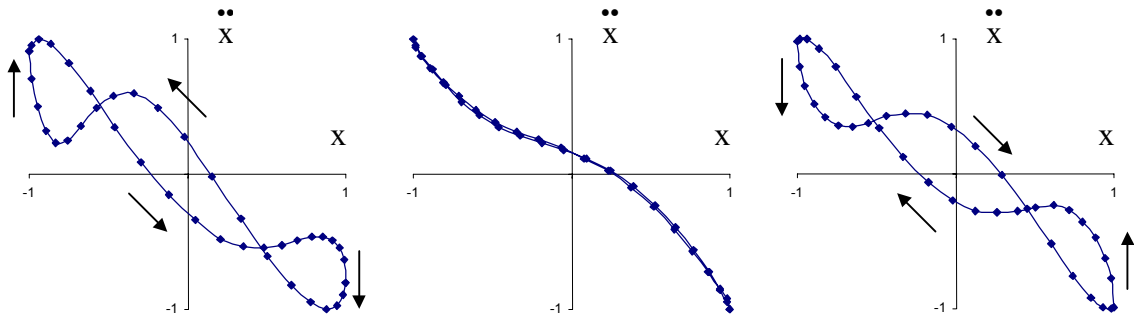


Figure 4-8: Portraits de Hooke (position vs accélération) caractéristiques des différentes étapes de l'apprentissage. Le graphique de gauche est typique des fonctions d'amortissement Rayleigh observées lors des premières semaines. Le graphique du centre est caractéristique des essais de transition. Enfin le graphique de droite, provenant d'un des derniers essais, est typique des fonctions d'amortissement van der Pol (essai tardif) Portraits réalisés à partir de données du sujet 1, essais 37, 91 et 335.

Il faut garder en mémoire que ces cycles moyens normalisés représentent la tendance moyenne d'une vingtaine de cycles successifs. Une analyse cycle à cycle est nécessaire pour comprendre la logique de leur élaboration. La figure 4-9 indique les coefficients $C_{01(\text{Rayleigh})}$ calculés pour l'ensemble des cycles correspondant aux trois portraits de Hooke de la figure 4-8. On voit que lors des essais précédant la transition, tous les cycles peuvent être modélisés avec une fonction d'amortissement de type Rayleigh. On retrouve la même homogénéité après la transition, avec cette fois des fonctions van der Pol. En revanche, les essais de transition sont caractérisés par une alternance continue, de cycle à cycle, entre amortissement Rayleigh et amortissement van der Pol.

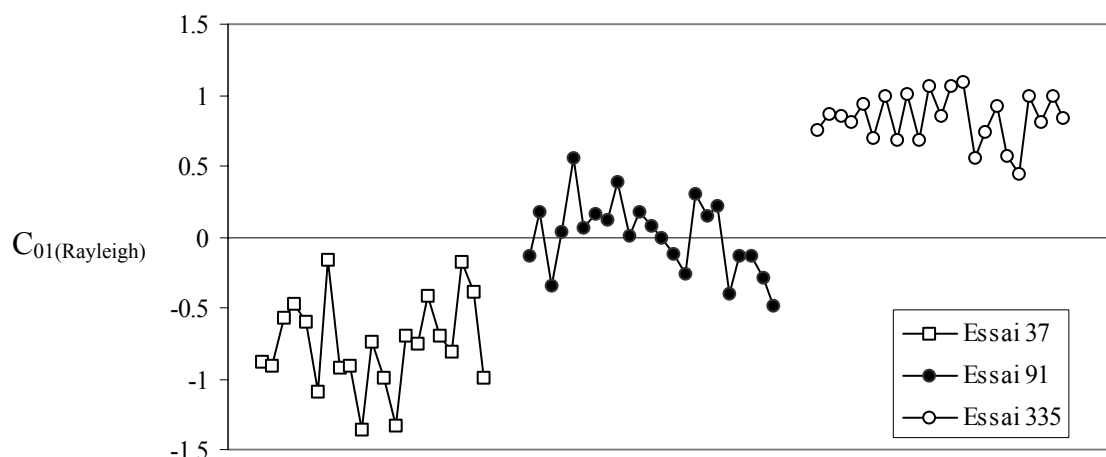


Figure 4-9: Analyse cycle à cycle des coefficients $C_{01(Rayleigh)}$, lors des essais 37, 91 et 335 du sujet 1. Ces essais correspondent aux portraits de Hooke présentés en figure 4.8.

4-5-2- Résultats du décalage de phase en relation avec les résultats de modélisation

Comme nous avons pu le constater dans les résultats précédents, le début de la période de l'apprentissage des oscillations au simulateur de mono-ski, correspond à un modèle de comportement d'amortissement de type Rayleigh. La fin de la période de l'apprentissage correspond par contre, à un modèle d'amortissement de type van der Pol. De ce fait nous avons pris en compte les valeurs de décalage de phase moyen (et leurs écarts types moyens) en déplacement vers la gauche et vers la droite pour les 10 essais de la troisième sessions, durant laquelle tous les sujets présentaient un comportement d'amortissement de type Rayleigh, ainsi que les valeurs des 10 dernières sessions d'apprentissage, qui correspondaient toutes à un comportement d'amortissement de type van der Pol.

Nous avons procédé, pour les valeurs de décalage de phase moyen (en déplacement vers la droite et vers la gauche) et pour leurs écarts-types moyens respectifs, à une ANOVA à trois facteurs : Période(2) X Décalage de phase(2) X Essais(10) à mesures répétées.

Lors de la troisième session de pratique, la valeur moyenne de décalage de phase entre la phase des oscillations horizontales du déplacement de la plate-forme et la phase des oscillations verticales du centre de gravité est de 61.79° (sd moyen : 10.96) pour le déplacement vers la droite et de 210.00° (s.d. moyen : 13.08) pour le déplacement vers la gauche (Figure 4-10 A). Ceci signifie que les sujets exercent un forçage sur la plate-forme

avant le passage au milieu du simulateur et ce indifféremment du sens de déplacement. La valeur moyenne du décalage de phase pour les dix dernières sessions d'apprentissage correspond à 95.17° (s.d. moyen :14.42) pour le déplacement vers la droite et à 232.9° (s.d.moyen :26 ;06) pour le déplacement vers la gauche (Figure 4-10 B). Ceci signifie que pour le déplacement vers la droite, les sujets exercent un forçage sur la plate-forme après le passage au milieu du simulateur. Par contre, lors de leur déplacement vers la gauche, leur forçage s'exerce toujours avant le passage au milieu.

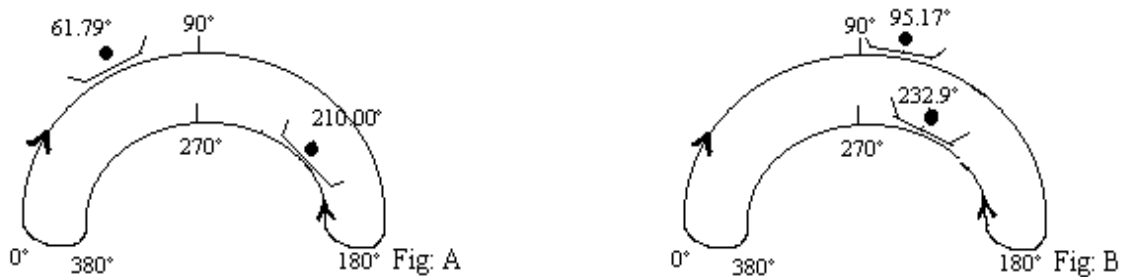


Figure 4-10: Représentation de la phase du chariot avec sa valeur moyenne lorsque la phase du centre de gravité est minimale (correspondant à la poussée exercée sur le chariot). Fig: A. Le décalage de phase est moyenné sur les 10 essais de la 4^{ème} session d'apprentissage et correspond à un comportement d'amortissement de type Rayleigh. Fig: B. Le décalage de phase est moyenné sur les 10 dernières sessions d'apprentissage et correspond à un comportement de type van der Pol.

Les valeurs de décalage de phases sont significativement différentes entre les deux périodes d'apprentissage, autant pour le déplacement vers la droite ($F_{1,4}=7.589$, $p<0.05$) que vers la gauche ($F_{1,4}=22.623$, $p<0.01$). Aucun autre effet ni interaction n'ont été révélés.

Toutes les valeurs des écarts types moyens ne présentent aucune différences significatives entre les deux périodes d'apprentissage ni entre les déplacements de direction opposée et ni entre les essais

4-6- Discussion

Cette expérimentation met donc en évidence le caractère discontinu de l'apprentissage des habiletés complexes, marqué par de profondes réorganisations qualitatives du comportement. On retrouve chez les cinq participants à ce travail des évolutions parallèles,

avec une première étape caractérisée par une faible fréquence d'oscillation, une raideur fortement non-linéaire, et une fonction d'amortissement de type Rayleigh, et une seconde étape marquée au contraire par une fréquence plus élevée, une linéarisation de la raideur, et une fonction d'amortissement de type van der Pol.

C'est lors de la première étape que l'on observe les principaux progrès en termes d'amplitude. C'est même lors de cette première étape que la plupart des sujets atteignent leurs records d'amplitude. Le comportement adopté spontanément par nos sujets, dès les premiers essais, s'avère donc remarquablement efficace. Nous avons fait la même observation lors de la première expérimentation présentée, portant sur l'apprentissage des balancers en suspension mi-renversée aux barres parallèles (voir Chapitre I et Delignières *et al.*, 1998): dans ce cas également les sujets adoptaient spontanément un mode de coordination qui leur permettait au bout de quelques séances d'apprentissage d'entretenir des oscillations d'amplitude similaire à celles de experts. Ce qui est important dans cette remarque, c'est d'une part que l'amplitude ne constitue certainement pas un critère de l'accès à l'expertise, et d'autre part, que l'on ne peut pas dire que le passage du premier comportement au second est déterminé par un manque d'efficacité.

Lors de cette première étape, la fonction de raideur est fortement non-linéaire. Le système, dans son ensemble, se comporte comme un ressort mollissant, puis durcissant. Il est important de se rappeler que la fonction de raideur détermine la fréquence de l'oscillateur. Le terme en x^3 , assorti d'un coefficient négatif entraîne un ralentissement local, alors que le terme en x^5 permet de restaurer la raideur initiale, au niveau du point de revirement. Durant cette première étape, le coefficient C_{30} est en valeur absolue plus important que le coefficient C_{10} , et détermine un "désaccordage" (*detuning*) du système, qui oscille alors à une fréquence inférieure à sa fréquence propre (Beek, Turvey & Schmidt, 1992).

L'introduction de termes non-linéaires dans la fonction de raideur a donc pour principale incidence de donner du temps aux sujets. Ce gain de temps se manifeste localement, comme une pause à l'approche des points de revirement des oscillations. On peut rappeler ici que Mottet et Bootsma (1999) ont mis en évidence une évolution similaire de la fonction de raideur, lors de la réalisation de tâches de pointage réciproque de Fitts: la raideur du système était quasi linéaire lorsque la tâche était facile, mais pour les tâches difficile, un terme non-linéaire de Duffing devait être ajouté au modèle pour rendre compte du caractère mollissant de la raideur du système. Cette diminution locale de la raideur permet dans ce cas

de stationner plus longtemps aux alentours des cibles, et donc de conserver une précision acceptable, tout en conservant la plus grande fréquence globale possible.

Nous nous situons ici dans une ligne de raisonnement similaire. Le débutant a besoin de temps pour gérer les points de revirement: il a repoussé le chariot loin de sa position centrale, et doit s'organiser pour bénéficier au maximum de la restitution de l'énergie stockée dans les bandes élastiques. Ceci demande des adaptations posturales complexes, que notre aménagement en monoski rend encore plus difficiles (rappelons que nos sujets sont en équilibre instable, la planche sur laquelle ils reposent étant relié au chariot par un axe de rotation unique). Le débutant ne peut réaliser ces adaptations en subissant la fréquence propre du système, que l'on peut supposer principalement déterminée par la raideur des bandes élastiques. La fonction de raideur que nous avons mise en évidence permet donc d'accorder aux sujets ce temps dont ils ont besoin, tout en continuant à bénéficier de la force de rappel du dispositif.

On peut penser que la fonction d'amortissement de Rayleigh participe également à l'accroissement du temps disponible, dans la seconde partie de la trajectoire, pour organiser le revirement suivant. L'amortissement de Rayleigh est en effet caractérisé par le fait que le pic de vitesse est atteint 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. Mottet et Bootsma (1999) obtiennent également, dans leur estimation de leur modèle de Rayleigh, des coefficients d'amortissement linéaire positifs lorsque la tâche est très facile: ils suggèrent alors qu'un modèle van der Pol pourrait sans doute dans ce cas mieux rendre compte de la dynamique du mouvement. Le modèle de Rayleigh semble donc jouer un rôle, dans les deux expérimentations, lorsque le système a besoin de temps dans la phase finale de la trajectoire, pour gérer le revirement du mouvement.

Cette interprétation ne justifie cependant pas la nécessité, à un moment donné, de la bifurcation vers un modèle van der Pol. On sait que les deux fonctions d'amortissements se distinguent dans les relations qu'elles induisent entre amplitude et fréquence. Dans le cas d'un amortissement van der Pol, la l'amplitude est indépendante de la fréquence. Par contre, pour un amortissement Rayleigh, l'accroissement de la fréquence tend à réduire l'amplitude.

Nous pensons toucher ici le point déterminant du passage du modèle Rayleigh au modèle van der Pol: lorsque les sujets parviennent à mieux maîtriser le revirement, le

ralentissement local (contrôlé par le terme x^3) ne présente plus de nécessité. Le coefficient C_{30} va donc diminuer (Figure 4-6), déterminant un accroissement de la fréquence (Figure 4-4). La relation amplitude–fréquence typique des oscillateurs de Rayleigh rend incompatible le maintien d'amplitudes élevées (rappelons que les sujets ont déjà atteint, à ce stade de l'apprentissage, une amplitude conséquente), et un accroissement de la fréquence (la fréquence passe en moyenne de 1 Hz à 1.4 Hz).

La bifurcation entre le modèle Rayleigh et le modèle van der Pol ne semble pas en général présenter de caractère abrupt (Figure 4-7). Elle se réalise progressivement, au cours d'essais de transition dont la caractéristique majeure est de ne plus présenter, au niveau des cycles moyens, de coefficients d'amortissement significatifs. En fait, on observe lors de ces essais de transition une alternance de cycle à cycle entre les deux types d'amortissement. Dans la mesure où les fonctions de Rayleigh et de van der Pol tendent à agir de manière orthogonale dans l'espace des phases (Mottet & Bootsma, 1998), il est logique que le cycle moyen, pour de tels essais, présente un caractère quasi harmonique.

On peut également noter que les coefficients des fonctions d'amortissement (C_{01} , C_{21} et/ou C_{03}), lors de ces essais de transition, sont en valeur absolue plus faibles que lors des étapes "Rayleigh" ou "van der Pol". Ces résultats sont typiques d'un régime bi-stable, au niveau duquel les deux attracteurs semblent disponibles, mais sans grande stabilité intrinsèque.

La dynamique de l'amortissement que nous venons de mettre en évidence semble cependant contredire des résultats antérieurs. Lors de la précédente expérimentation sur le simulateur de ski, nous avons mis en évidence chez 14 des 15 participants des fonctions d'amortissement de type van der Pol, au cours de 4 sessions de pratique. Il est important de noter que cette première expérimentation avait été réalisée avec la version commercialisée du simulateur (avec un support indépendant pour chaque pied), sans doute plus aisée à maîtriser que la présente version monoski. Par ailleurs, bien que n'ayant aucune expérience antérieure sur le simulateur, les participants de cette première expérimentation n'étaient pas réellement novices, ce qui leur avait permis notamment d'atteindre dès le premier essais les amplitudes requises par le protocole expérimental, soit 15 cm, 22.5 cm ou 30 cm, en fonction du groupe auquel chacun avait été assigné. On peut noter également que lors des divers travaux de Vereijken (1991), les amplitudes atteintes lors des premiers essais étaient plus faibles, de l'ordre de 5 à 10 cm.

Rappelons que Vereijken (1991) avait montré que le décalage de phase entre les oscillations du simulateur et les oscillations verticales du centre de gravité constituait une variable collective pertinente pour rendre compte de la coordination et de son évolution. L'auteur montrait notamment que lors des premières séances, l'oscillation verticale du centre de gravité était initiée dans la première moitié de la trajectoire du chariot, donc avant le passage en position centrale. Après quelques sessions de pratique, l'initiation de l'oscillation verticale de centre de gravité apparaissait plus tardivement, au-delà du passage en position centrale. Nos résultats concernant les valeurs de décalage de phase confirment ceux de Vereijken (1991). Lors de la première étape de l'apprentissage (modèle Rayleigh), le décalage de phase à l'initiation de l'oscillation verticale est en moyenne de 61.79 degrés lors du déplacement vers la droite, et 210.00 degrés lors des déplacements vers la gauche. Lors de la deuxième étape (modèle van der Pol), les données moyennes étaient respectivement égales à 95.17 degrés et 232.90 degrés. Rappelons qu'un décalage 90 degrés (ou 270 degrés en sens inverse) correspondrait à une initiation juste au passage en position centrale. Le passage du modèle Rayleigh au modèle van der Pol entraîne un report de l'initiation du forçage, aux alentours du passage en position centrale. On peut noter cependant que ces résultats révèlent une asymétrie assez importante en ce qui concerne le modèle van der Pol, puisque le forçage intervient après le passage en position centrale lors des déplacements vers la droite, mais avant lors des déplacements en sens inverse. Plusieurs interprétations peuvent être faites. Tout d'abord, cette asymétrie peut révéler une asymétrie fonctionnelle des sujets se concrétisant par une meilleure efficacité et stabilité des comportements initiés par un côté du corps considéré comme préférentiel pour l'exécution du mouvement. Il est donc possible que nos sujets présentent une symétrie fonctionnelle privilégiant la jambe droite, ce qui expliquerait qu'il parvienne à optimiser le déplacement vers la droite sans parvenir encore à rendre le déplacement vers la gauche efficace. Ensuite une deuxième interprétation peut nous amener sur le pôle stratégique de l'apprentissage. Nous savons que les sujets, lors de l'acquisition de l'habileté, élaborent des stratégies différentes pour répondre aux exigences de la tâche et pour optimiser la performance (Newell, *et al.*, 1989; Durand, 1992 a, b, ; Durand *et al.*, 1994). Pour notre étude, nous pourrions concevoir que nos sujets stabilisent un comportement expert pour un déplacement dans une direction particulière (qui en l'occurrence correspondrait à leur asymétrie fonctionnelle) et tentent, recherchent la solution optimale pour l'autre déplacement. Ceci expliquerait que les sujets exercent un forçage efficace lors du déplacement vers la droite et ne présentent encore qu'un comportement de sujets « avancé » (pour reprendre la distinction de Vereijken, 1991) pour l'autre déplacement vers la gauche. Enfin, une dernière

interprétation pourrait concerner notre méthode de moyennage des cycles. Une oscillation complète comprend un demi-cycle correspondant au déplacement vers la droite et un autre demi-cycle correspondant au déplacement vers la gauche. Il est commun de faire le moyennage d'un cycle au travers d'un seul demi-cycle, considérant a priori que le deuxième demi-cycle est identique. Mais, compte tenu de notre résultat et des interprétations faites précédemment, il serait peut-être pertinent de faire un moyennage par demi-cycle indépendant afin d'appréhender les différences de stratégie qu'un moyennage sur un cycle complet pourrait dissoudre.

Néanmoins, les comportements de forçage peuvent être prédits au travers de l'analyse de la fonction W typique des amortissements Rayleigh et van der Pol. La fonction W est définie par Beek et Beek (1988) comme l'ensemble des composantes du modèle dynamique qui écartent le système d'un mouvement purement harmonique

$$\ddot{x} + x + W(x, \dot{x}) = 0$$

La figure 4-11 décrit les simulations numériques des fonctions W , pour un oscillateur de Rayleigh (à gauche) et un oscillateur de van der Pol (à droite). On a indiqué en gras l'évolution de cette fonction lors d'un déplacement de gauche à droite. Les valeurs positives renvoient à des gains d'énergie, et les valeurs négatives à de la dissipation. On voit clairement que le modèle Rayleigh est caractérisé par un apport d'énergie très précoce, dès le début du déplacement. Par contre, dans le modèle van der Pol l'apport d'énergie est plus tardif, au alentour du passage en position centrale.

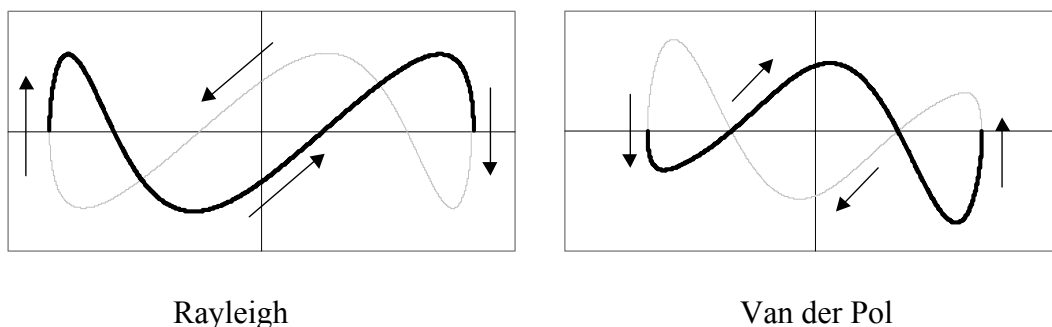


Figure 4-11: Simulations des fonctions $W(x, \dot{x})$ obtenues avec un oscillateur de Rayleigh ($\ddot{x} + x - \dot{x} + \dot{x}^3 = 0$) et un oscillateur de van der Pol ($\ddot{x} + x - \dot{x} + x^2\dot{x} = 0$).

Ces résultats suggèrent donc que lors de ses expérimentations, Vereijken (1991) a bien obtenu une bifurcation similaire à la nôtre, d'un modèle Rayleigh à un modèle van der Pol. Le modèle Rayleigh correspondrait au comportement de débutants. Les participants quittent ce statut relativement vite sur le simulateur classique, avec plus de difficulté sur notre version monoski. Nous faisons l'hypothèse que les sujets qui ont participé à notre précédente expérimentation n'étaient pas réellement débutants ou ont pu rapidement dépasser ce statut lors des quelques essais de découverte qui leur ont été proposés avant l'expérimentation proprement dite.

4-7- Etude complémentaire sur la modélisation des oscillations sur simulateur de ski

4-7-1-Méthode

Sujets

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 sujets n'avaient aucune expérience antérieure sur le simulateur de ski, et ne pratiquait pas par ailleurs le ski de manière régulière. Ces sujets ont signé un formulaire de consentement, et n'étaient pas payés pour leur participation.

Dispositif

L'expérimentation a été réalisée sur un simulateur de ski de marque Skier's Edge, déjà décrit dans ce document (voir chapitre II, partie 2-1). Nous avons utilisé la version commerciale du chariot, les deux pieds étant fixés sur deux supports indépendants.

Procédure

La consigne donnée aux sujets 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

sujets pratiquaient individuellement. En totalité, les sujets ont donc réalisé 24 essais de 4 minutes.

La position du centre de la plate-forme 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 pour la plate-forme. Les données ont été stockées sur un ordinateur personnel pour les traitements subséquents.

Pour chaque essai, on a retenu 4 échantillons de 2000 données, prélevées respectivement à partir de 30 secondes, 90 secondes, 150 secondes, et 210 secondes. On obtient donc pour chaque sujet 60 séries, 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.

Puis ces séries ont été modélisées selon la méthode présentée dans le chapitre précédent, adaptée de la *W-method* de Beek et Beek (1988). Rappelons que cette méthode inclut les étapes suivantes:

(1) Construction d'un cycle moyen normalisé en 42 points, représentant la dynamique de l'attracteur du système.

(2) Identification, par des procédures graphiques, des termes à inclure dans les fonctions de raideur et d'amortissement de l'équation de mouvement

(3) Estimation, par une procédure de régression multiple, des coefficients de chacun de ces termes.

La consommation d'oxygène a été mesurée en continu par un appareil Cosmed K2, un système portable télémétrique qui mesure le $\dot{V}E$ (volume 'air expiré en litres par minutes), et le $\dot{V}O_2$ (volume d'oxygène consommé en litres par minutes). Les sujets étaient équipés d'un masque, connecté à une unité d'analyse et de transmission (poids: 400g), fixé au niveau de la ceinture. Les données étaient envoyées par télémétrie à une unité de réception et stockées pour les analyses ultérieures. Ces données ont été moyennées par le système pour chaque intervalle de 30 secondes. 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. On ne prend en compte que les données obtenues lors des trente dernières secondes des deux dernières minutes de chaque essai.

L'efficacité physiologique a été évaluée par le calcul du coût du mouvement, définie comme le rapport $\dot{V}O_2/(\text{amplitude} \times \text{fréquence})$ (Durand *et al.*, 1994) . Deux évaluations du coût sont réalisées par essai, sur la base des données obtenues pour les deux dernières minutes.

4-7-2- Résultats

-Amplitude

On retrouve chez les trois sujets une évolution similaire de l'amplitude (Figure 4-12) : l'amplitude maximale est atteinte au cours de la première session, au troisième essai pour le sujet 1, et dès le second pour les sujets 2 et 3. Les sujets sont d'emblée capable de réaliser des amplitudes comprises entre 15 et 20 cm. Par contre les amplitudes maximales restent relativement faibles: 30 cm pour le sujet 1, un peu plus de 40 cm pour le sujet 2 lors de la seconde session, puis l'amplitude tend à décroître, 35 cm pour le sujet 3.

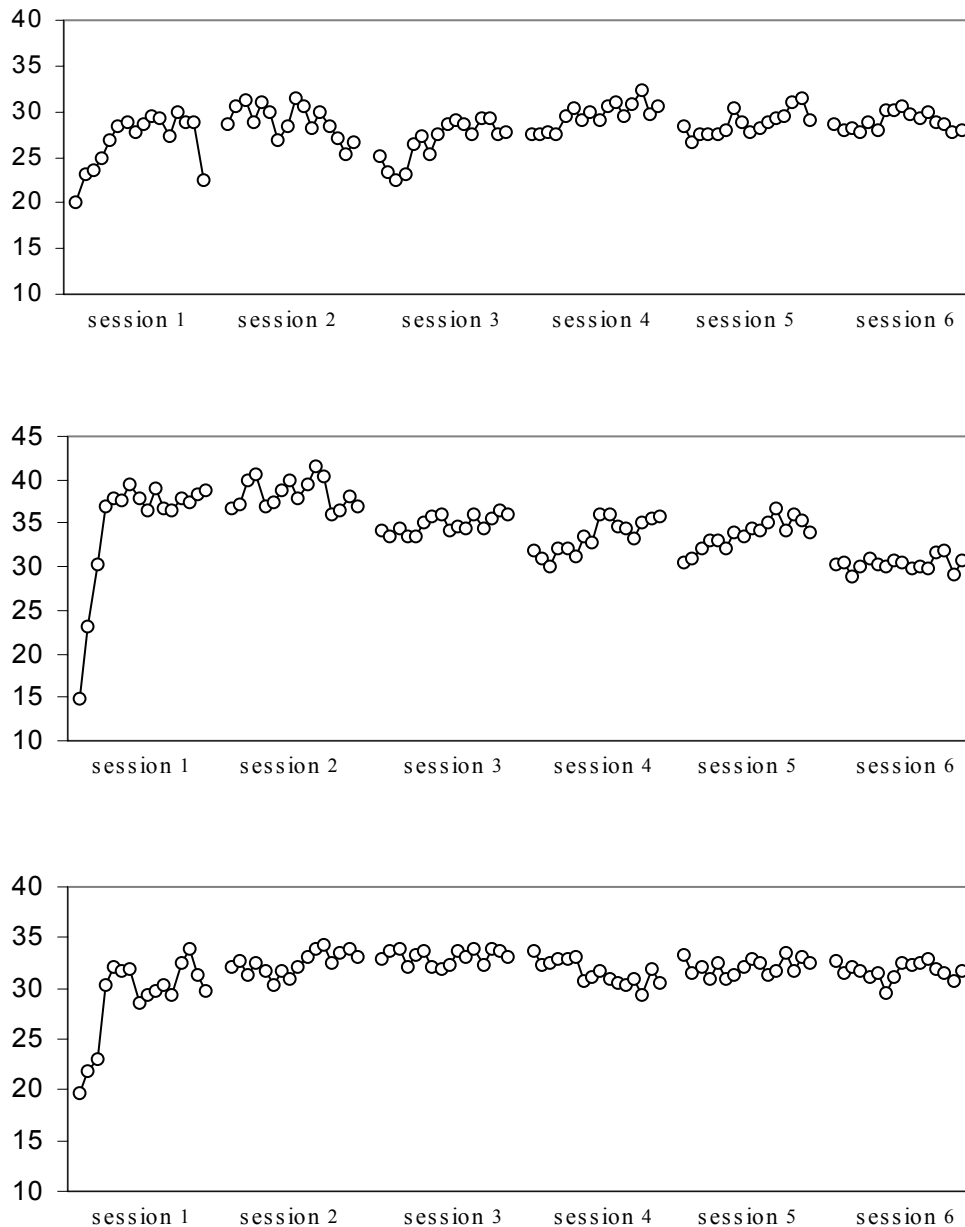


Figure 4-12: Séries temporelles individuelles de l'amplitude des oscillations.

-Fréquence.

L'évolution de la fréquence présente trois profils très différents (Figure 4-13), même si d'une manière générale les fréquences tendent à augmenter au cours de l'expérimentation. Le sujet 1 présente un accroissement très progressif, mais également très modéré, de la fréquence. Chez le sujet 2, on a un accroissement plus brutal: après un essai réalisé à une fréquence comprise entre .8 et .9 HZ, le sujet s'installe de manière durable autour de 1 Hz.

Enfin le sujet 3 présente un accroissement abrupt, mais assez tardif, de la fréquence (au premier essai de la session 5).

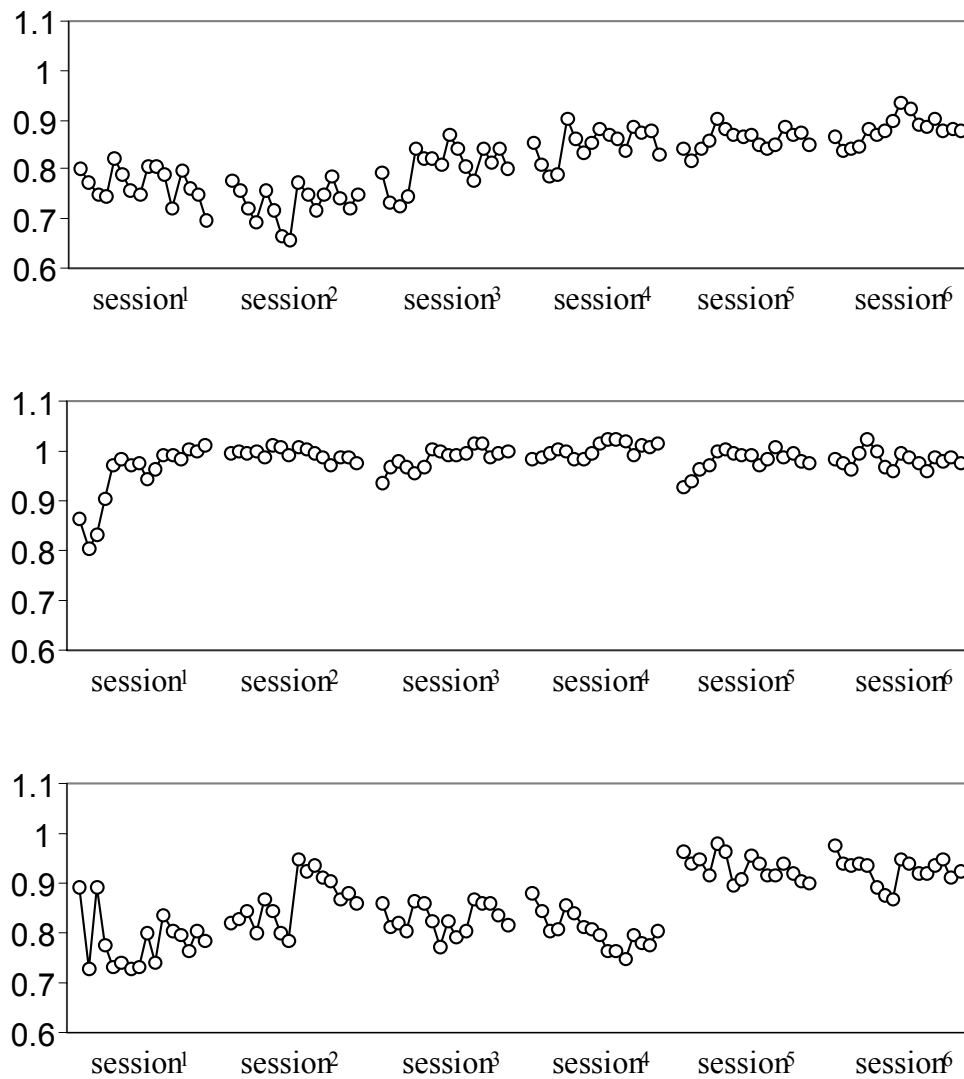


Figure 4-13: Séries temporelles individuelles de la fréquence des oscillations.

- Coefficients de raideur.

Les coefficients de la fonction de raideur (c_{10} , c_{30} et c_{50}) évoluent de manière parallèle au cours de l'expérimentation. Nous avons représenté à titre d'exemple en figure 4-14 les séries temporelles individuelles du coefficient c_{30} . Comme dans l'expérience réalisée avec la version monoski, ces coefficients présentent au début de l'expérience des valeurs absolues élevées (c_{10} , et c_{50} étant positifs, et c_{30} négatif). Avec la pratique, c_{10} se stabilise sur des

valeurs proches de 1, alors que c_{30} et c_{50} rejoignent des valeurs voisines de 0. La pratique semble donc induire ici encore une linéarisation de la fonction de raideur.

Cette linéarisation s'installe très progressivement pour les sujets 1 et 3, mais de manière beaucoup plus abrupte pour le sujet 2, avec une diminution brutale des coefficients non-linéaires au cours du second essai de la première session.

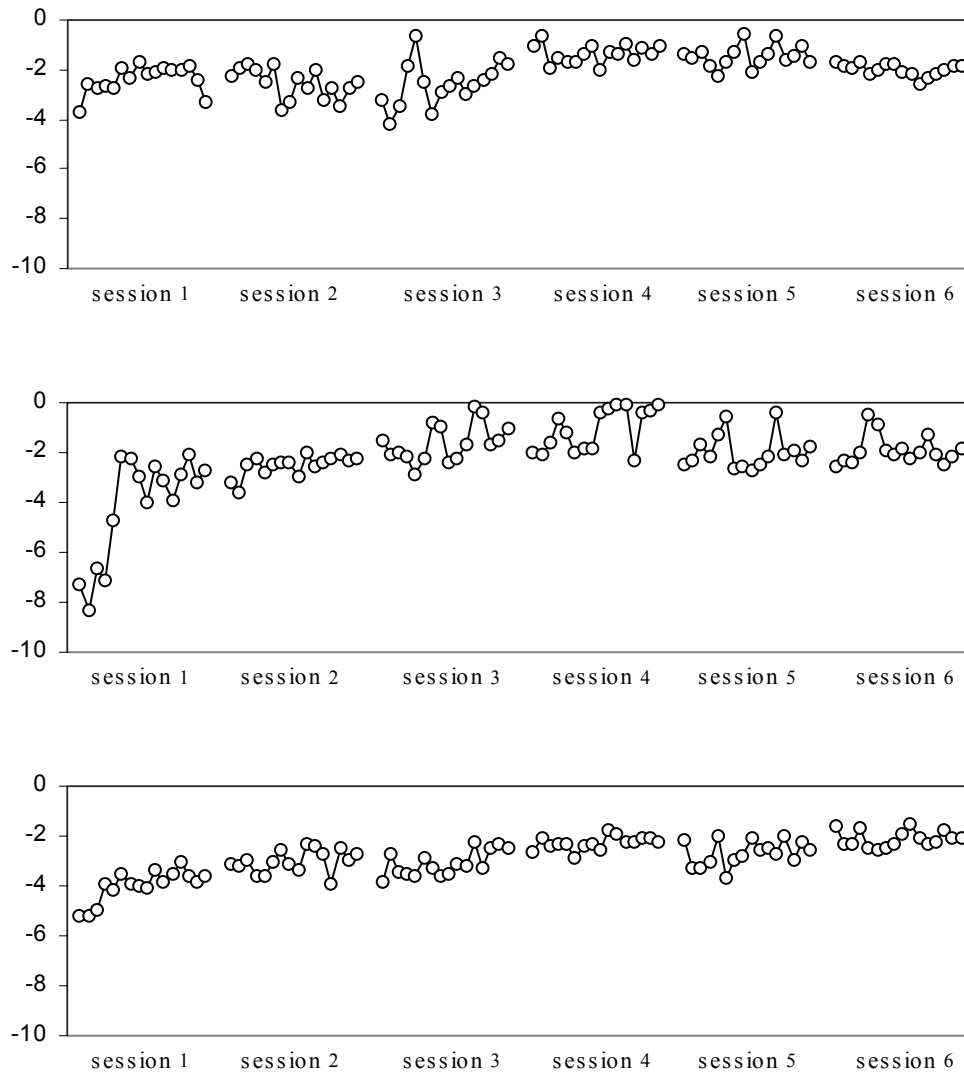


Figure 4-14: Séries temporelles individuelles du coefficient de raideur C_{30} .

- Fonction d'amortissement

On retrouve, chez tous les sujets, une évolution des modèles assez similaire. Comme dans l'expérience précédente, on peut dire que les premiers essais sont caractérisés par l'exploitation d'une fonction d'amortissement de type Rayleigh, et que les sujets tendent par la

suite, à l'exploitation de fonction d'amortissement de type van der Pol. Afin de mieux visualiser cette évolution, nous avons représenté en Figure 4-15 les séries temporelles du coefficient $C_{01(\text{Rayleigh})}$ obtenu lors de l'ajustement d'un modèle Rayleigh (équation 4) au cycle moyen normalisé. Rappelons que lorsque ce coefficient est négatif, on doit considérer que le sujet exploite un modèle Rayleigh, d'autant plus stable que le coefficient présente une valeur absolue élevée. Lorsque ce coefficient est positif, le modèle Rayleigh est instable, et le sujet exploite à l'inverse une fonction de van der Pol. Le passage des valeurs négatives aux valeurs positives doit être conçu comme une transition qualitative, entre deux modes distincts de coordination.

Le sujet 1 présente lors des deux premières sessions un comportement relativement instable, oscillant fréquemment entre Rayleigh et van der Pol. La troisième session constitue une sorte de régression, par rapport à la forme générale de l'évolution, avec l'adoption assez nette d'un comportement de type Rayleigh, notamment lors des essais 2 et 3. Les trois dernières sessions semblent par contre dominées par un comportement van der Pol, même si régulièrement le coefficient revient à des valeurs proches de zéro, traduisant l'instabilité persistante du système.

Le sujet 2 présente au premier essai un comportement Rayleigh très marqué. Puis il semble s'installer dans une zone particulièrement instable, au cours de laquelle le coefficient oscille en permanence entre les valeurs positives et négatives, jusqu'à la fin de la troisième session. A partir du début de la quatrième session, ce sujet semble exploiter de manière systématique une fonction de type van der Pol, même si la dernière session paraît davantage instable.

Enfin on trouve pour le troisième sujet une évolution très progressive. Les trois premières sessions sont caractérisées par un comportement Rayleigh assez consistant, si ce n'est lors du troisième essai de la seconde session, où semble exploité de manière assez fugitive une fonction de type van der Pol. Le système rejoint ensuite une zone d'instabilité, où il oscille continuellement entre les deux types de comportement. On ne peut pas affirmer que ce sujet installe de manière consistante un comportement de type van der Pol.

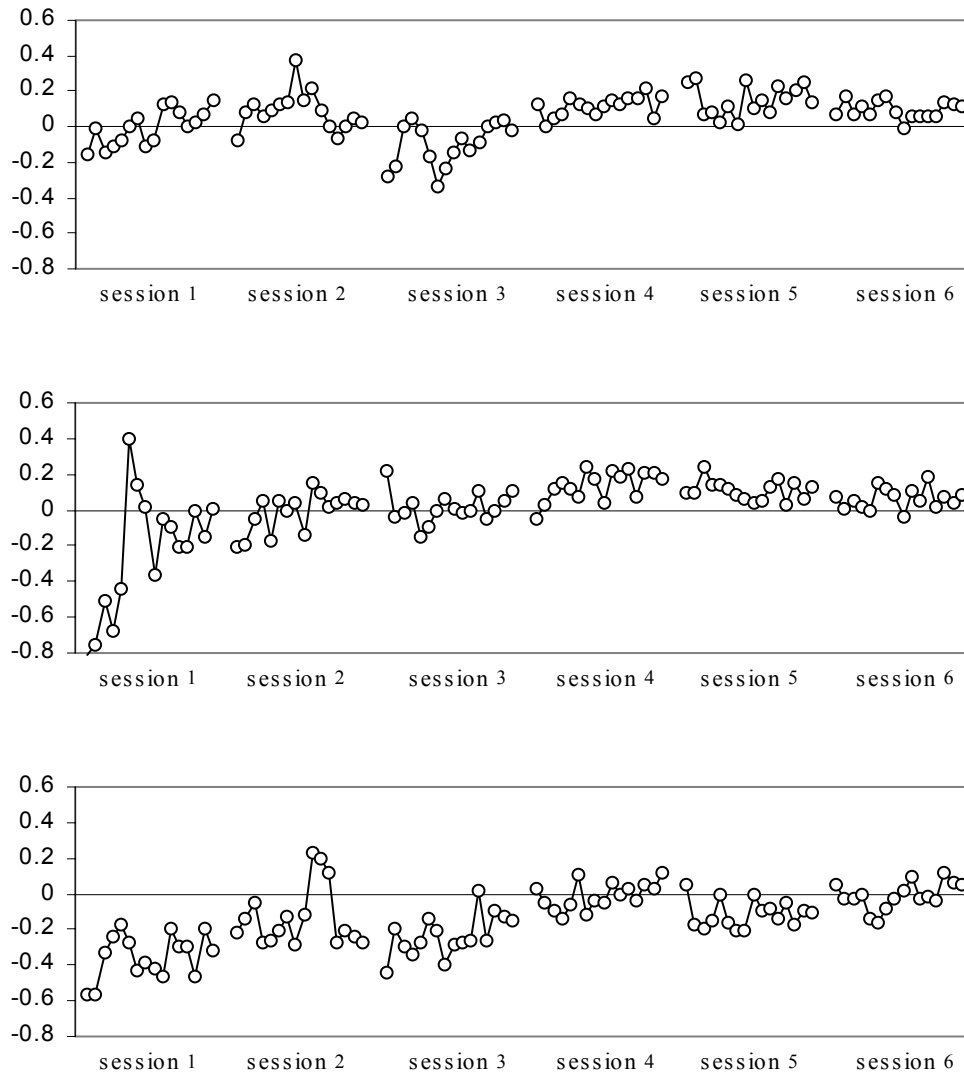


Figure 4-15: Séries des coefficients d'amortissement linéaire obtenus lors de l'estimation d'un modèle "Rayleigh". Lorsque ce coefficient est négatif, le modèle de Rayleigh est stable. Lorsqu'il est positif, les données peuvent généralement être ajustées sur un modèle de type van der Pol. La bifurcation apparaît donc au moment où la courbe passe des valeurs positives aux valeurs négatives.

- *Coût du mouvement.*

D'une manière générale, les résultats décrivent une diminution du coût du mouvement avec la pratique (Figure 4-16). Ici encore les évolutions sont très individualisées. Chez le sujet 1 le coût reste stable durant les trois premières sessions, et ne semble entamer un processus de réduction qu'à partir de la quatrième session. Le sujet 2 présente pour sa part une diminution de forme exponentielle, très marquée lors de la première session. Le coût se stabilise, chez ce sujet, à partir de la troisième session. Enfin pour le sujet 3, on constate à nouveau une

diminution de forme exponentielle, très marquée lors de la première session. A noter que le passage de la quatrième à la cinquième session semble marquer une rupture, avec une nouvelle diminution du coût du mouvement.

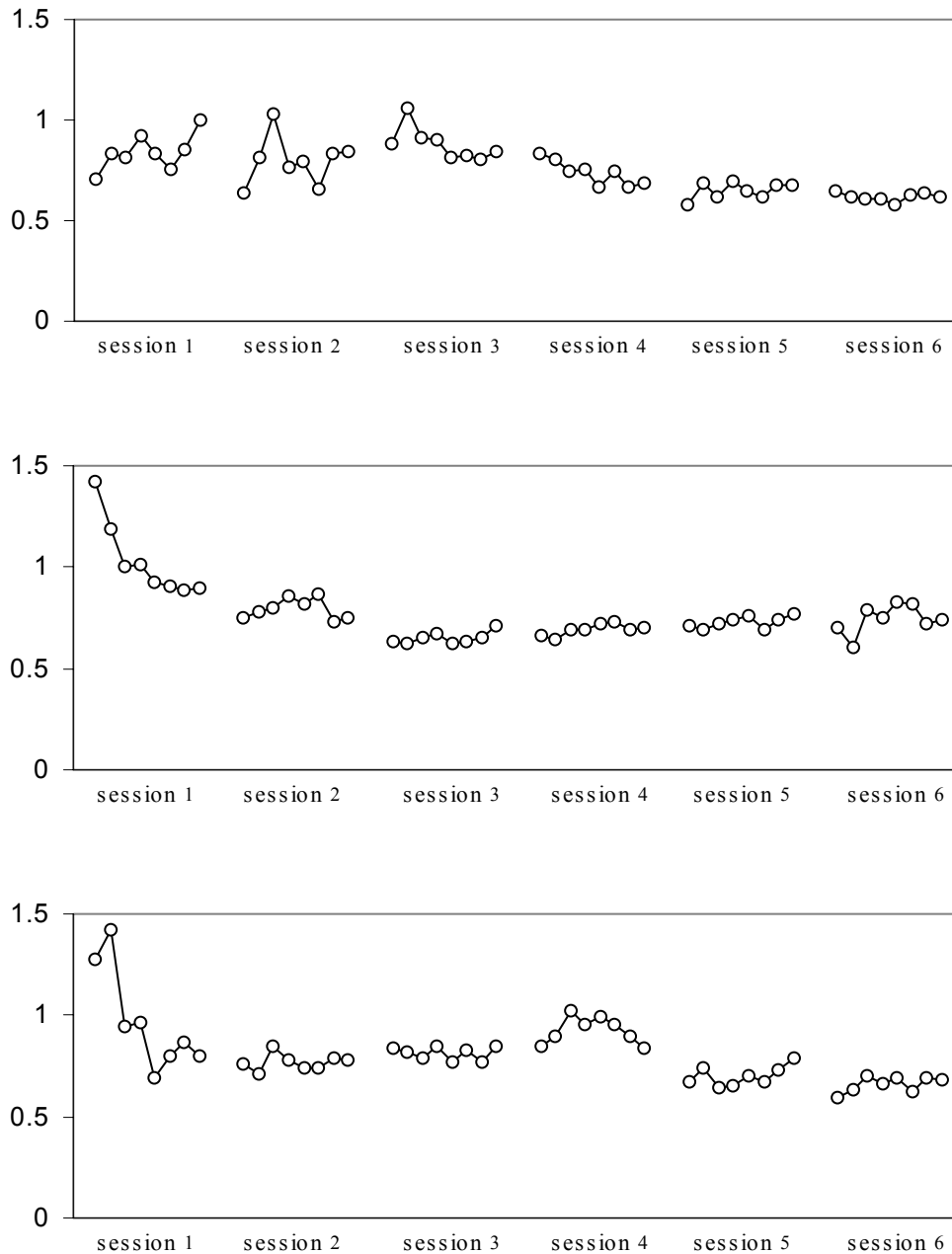


Figure 4-16: Evolution du coût du mouvement, au cours des 6 sessions de pratique.

4-7-4- Discussion

Il convient tout d'abord de bien garder en mémoire que ces résultats représentent une échelle de temps bien plus restreinte que celle de l'expérimentation précédente : ces trois

sujets ont cumulé ainsi 96 minutes de pratique, contre 390 pour les cinq précédents. Le résultat le plus attendu est évidemment l'évolution relativement rapide du coefficient $C_{01(Rayleigh)}$. A un moment où les 5 sujets de l'expérience précédente exploitent encore de manière stable et consistante un modèle de type Rayleigh, les 3 participants de la présente expérimentation ont déjà adopté un comportement de type van der Pol, ou sont entrés dans la phase de transition débouchant à terme, à l'adoption définitive du comportement de type van der Pol. On décrit en fait dans ces deux expérimentations le même type d'évolution, qui semble beaucoup plus lent pour la version monoski du simulateur, que pour la version classique.

Ce constat explique, à notre sens, pourquoi lors de notre première tentative de modélisation sur le simulateur, nous n'avions mis en évidence que des fonctions d'amortissement de type van der Pol, chez la plupart de nos sujets (voir chapitre III).

4-8-Conclusion générale du chapitre

Cette expérimentation montre clairement que l'apprentissage moteur est un processus marqué par de profondes réorganisations qualitatives du comportement. Nos résultats permettent de distinguer deux étapes. La première étape correspond à un comportement spontané, exploité et progressivement optimisé durant quelques semaines. Elle se caractérise un amortissement de type Rayleigh et par une forte raideur non-linéaire rendant compte d'un ralentissement local au niveau des points de revirement. Ce modèle comportemental semble exprimer les problèmes de contrôle que rencontre le sujet et s'accorde avec la stratégie de forçage de débutant que nous avons relevé. En effet, au comportement d'amortissement de type Rayleigh correspond un décalage de phase inférieur à 90° ce qui signifie que le sujet exerce une poussée sur la plate-forme avant le passage au milieu du simulateur de ski. Nos résultats confirment ceux de Vereijken (1991). Il semblerait donc que cette première étape se caractérise par la nécessité de contrôle de l'oscillation et constitue une étape dite de novice.

La seconde étape renvoie à l'adoption d'un comportement expert dans le sens où l'on observe d'une part une linéarisation de la fonction de raideur qui correspond à une exploitation des forces réactives du système (Vereijken *et al.* 1997) et d'autre part à l'adoption d'un comportement d'amortissement de type van der Pol dans lequel l'apport d'énergie est plus tardif et correspondrait aux valeurs de décalage de phase que nous avons obtenus. En effet durant la période caractérisant l'adoption d'un comportement van der Pol,

les sujets exercent, du moins pour un sens du déplacement, une poussée après le passage au centre du simulateur de ski. Il n'y a plus de ralentissement local à l'approche du revirement du mouvement et les forces du système sont exploitées ; c'est en ce sens que l'on peut considérer que cette étape constitue, comme l'avait Vereijken (1991), une étape dite « experte ».

Nous suggérons d'une manière plus générale que le modèle Duffing +Rayleigh correspond au comportement du débutant et que le modèle Duffing + van der Pol correspond à celui de l'expert. Cette suggestion est appuyée par une certaine interprétation que l'on peut faire des travaux de Mottet & Bootsma (1999). A fort indice de difficulté (ID) ces auteurs relèvent l'adoption d'un comportement de type Rayleigh pour l'exécution de la tâche de pointage de Fitts. Par contre à faible ID c'est le modèle d'amortissement de type van der Pol qui semble rendre compte au mieux du comportement. Ces deux tâches présentent une certaine parenté, dans la mesure où le débutant dans notre tâche et le sujet confronté aux tâches de pointage à fort ID ont de gros problèmes pour gérer les points de revirement des oscillations (pour des problèmes posturaux dans le premier cas, pour satisfaire aux exigences de précision dans le second). La solution consiste dans les deux cas à générer un ralentissement local au voisinage du point de revirement, de manière à gagner ponctuellement du temps tout en maintenant la fréquence globale. Le terme non-linéaire cubique de Duffing et la fonction d'amortissement de Rayleigh concourent tous deux à ce ralentissement local. Ces problèmes de gestion des points de revirement ne se posant plus pour l'expert ou pour les sujets confrontés aux tâches de pointage à faible ID, une fonction d'amortissement de van der Pol associé à une raideur quasi-linéaire favorise une exploitation plus optimale des propriétés élastiques du système.

Nous avons relevé une certaine incohérence entre nos résultats du chapitre III et ceux du chapitre IV. En effet pour l'exécution des oscillations au simulateur de ski classique, nous avons constaté que le modèle rendant compte au mieux du comportement était celui de Duffing + van der Pol (dans la majorité des cas). Au contraire pour les oscillations sur le simulateur de ski modifié en mono-ski, c'était le comportement de type Duffing + Rayleigh qui apparaissait le plus pertinent lors des premières sessions. Nous pensons que la courte session de familiarisation dont ont bénéficié les sujets lors de l'expérimentation du chapitre III a généré plus d'incidence que prévu dans le sens où nos débutants avaient sans doute à cette occasion dépassé le stade où le modèle Rayleigh est nécessaire. C'est pour cette raison

que nous avons procédé à une expérimentation complémentaire sur simulateur de ski classique avec de « réels » débutants qui nous a confirmé que le premier comportement adopté correspondait bien à un comportement Duffing + Rayleigh. Mais la persistance de ce comportement s'est révélée tout de même beaucoup plus courte que pour celle de l'expérimentation longitudinale; très certainement en raison de la complexité supplémentaire qu'engendrait la transformation en mono-ski, au niveau de l'équilibre et de son contrôle.

Enfin, nous avons pu constater que le passage d'une étape à l'autre peut être conçu comme une bifurcation, au sens de la théorie des systèmes dynamique, entre deux attracteurs potentiels du système. Cependant cette transition s'opère de façon progressive.

CONCLUSION et PERSPECTIVES

L'objectif de notre étude était de contribuer à la compréhension des principes dynamiques sous-tendant l'acquisition d'une nouvelle habileté complexe, sollicitant la coordination de la totalité du corps. Nous nous sommes attachés à répondre au problème de l'évolution des coordinations durant toute la période d'acquisition d'une habileté ; nous avons donc étudié successivement, les caractéristiques d'une coordination spontanée et les effets des contraintes dans sa stabilisation et son efficacité, ainsi que l'évolution des coordinations par la détermination de variables susceptibles de capturer ensemble de la coordination.

Nous rappellerons en conclusion nos résultats essentiels en suivant le déroulement chronologique et logique de nos expérimentations et en ayant le souci de présenter leur filiations théorique ainsi que leurs éventuelles implications pratiques

Notre premier résultat concerne la caractérisation des coordinations spontanées lors de l'acquisition d'une habileté gymnique nouvelle. De nombreuses expérimentations, dans le cadre de l'approche dynamique, ont évoqué l'importance des coordinations spontanées - constituant la dynamique intrinsèque du système-, mais ces investigations concernaient le plus souvent des tâches de coordination bi-segmentaires. La caractérisation des coordinations spontanées dans des tâches quasi écologiques reste rare dans la littérature, si l'on excepte le travail de Vereijken (1991). Les coordinations spontanées adoptées en début d'apprentissage révèlent une grande stabilité en termes de phase relative et de rapport de fréquences. Durant toute la durée de notre première expérimentation, tous les novices ont exploité le même pattern, caractérisé par une synchronisation absolue des phases et des fréquences des oscillations verticales et pendulaires du centre de gravité. Dans la mesure où ce pattern a été adopté par l'ensemble des sujets, au cours des huit sessions de pratique, on peut le considérer comme un attracteur intrinsèque du système, semblant fortement contraindre le comportement des débutants. La persistance et la stabilité du mode de coordination initial, même après quatre-vingt essais, montre que les coordinations préférentielles sont très difficiles à dépasser.

Pourtant cette coordination typique des novices est clairement moins efficace que celle observée chez nos sujets experts; les novices n'exploitent pas le travail mécanique de la gravité et forcent le système tout au long de l'oscillation pendulaire. Il semble que malgré tout, ce pattern soit le plus facile à exécuter et à contrôler pour ces sujets dans le sens où la

synchronisation de l'initiation de l'oscillation verticale avec le début du balancer en arrière représente un point d'ancrage qui permet un contrôle de la coordination. Ainsi l'exécution d'un sujet débutant ne devrait pas être considérée comme une exécution imparfaite, mais comme la meilleure solution adoptée par le sujet pour parvenir à contrôler dans un premier temps la complexité de la tâche. L'un des problèmes pour la poursuite de l'apprentissage semble donc résider dans le dépassement de ces modes de coordination spontanés afin d'atteindre des solutions permettant d'exploiter de façon plus efficiente les forces passives du système.

Nos résultats montrent néanmoins que les modes de coordination spontanés résistent âprement à la pratique répétée. Nos sujets ne bénéficiaient cependant d'aucune aide à l'apprentissage, et la question demeure en suspens, dans ce type de tâche globale, des interventions susceptible de faciliter le dépassement des réponses premières. L'étude de Walter et Swinnen (1992) sur l'*adaptive tuning* évoque l'intérêt de la diminution contrôlée du pouvoir attractif du comportement spontané pour faciliter l'acquisition d'un nouveau pattern. Cette démarche repose cependant sur une modulation d'un paramètre de contrôle dûment identifié (dans ce cas la fréquence d'oscillation). Quel paramètre pourrait contrôler le niveau d'attraction des coordinations spontanées dans notre tâche expérimentale?

Notre seconde expérimentation visait à analyser les effets d'une modulation du niveau de contraintes sur l'évolution des coordinations avec la pratique sur le simulateur de ski. Nous sommes partis de l'hypothèse selon laquelle les contraintes jouant un rôle de canalisation sur le processus de recherche de solution motrice (Newell *et al.*, 1989 ; Newell, 1991), un niveau de contrainte plus élevé pouvait faciliter l'émergence d'une solution optimale et à terme favoriser l'apprentissage. Lorsque l'amplitude requise est élevée, les sujets présentent en effet des fréquences plus stables, et l'ensemble des sujets du groupe tendent à converger vers une fréquence d'oscillation commune. L'ensemble des variables dépendantes ne vont cependant pas dans le sens de notre hypothèse, et notamment l'amplitude requise ne semble pas avoir d'effet sur l'efficacité, ni sur l'harmonicité. Enfin les résultats des tests de transfert suggèrent que l'effet de canalisation opéré par les contraintes de s'inscrit pas dans la durée : lorsque l'on réduit l'amplitude requise, la fréquence devient plus variable, et les fréquences adoptées par l'ensemble de groupe tendent à diverger.

Aucune des deux premières expérimentations ne nous avait permis de mettre en évidence de modifications évidentes et surtout durables du comportement de nos sujets

débutants. C'est pourquoi nous avons décidé de réaliser un suivi longitudinal des modes de coordination dans une tâche complexe, en laissant l'apprentissage se dérouler aussi longtemps qu'il serait nécessaire pour voir apparaître et se stabiliser de nouveaux modes de réponse. Nous avons utilisé à cette fin le simulateur de ski, qui permettait sans traumatisme de poursuivre la pratique sur une durée assez longue. La mise au point de cette expérimentation requérait au préalable un travail sur la détermination des variables collectives les plus pertinentes pour rendre compte de l'évolution de la coordination. Vereijken (1991) avait utilisé dans cette tâche le décalage de phase entre les oscillations du chariot et les oscillations verticales du centre de gravité. Nous avons eu recours également à cette variable lors de notre première expérimentation sur les barres parallèles. Cette variable nous semblait tout de même présenter quelques limites dans le sens où il ne donnait que des informations d'état très ponctuelles. Nous avons tenté de recourir à la modélisation dynamique des comportements (Beek & Beek, 1988), afin de caractériser en d'autres termes les différents modes de coordination et d'en avoir surtout une description plus continue. Nous avons mis au point une adaptation de la méthode originale de Beek et Beek (1988) au travers d'un nouveau traitement des données de notre deuxième expérimentation. Cette démarche nous a permis de caractériser le mode de coordination adopté par la quasi-totalité des sujets au travers d'une fonction de raideur de type Duffing et d'une fonction d'amortissement de type van der Pol. Le principal intérêt de nos résultats résidait dans l'importance de la non-linéarité de la raideur dans les mouvements biologiques et dans la progressive linéarisation de cette raideur avec la pratique, malgré le maintien des modèles représentatifs du comportement.

Notre étude longitudinale sur l'apprentissage des oscillations sur simulateur de ski modifié en mono-ski, nous a permis d'étudier le dépassement des modes de coordinations spontanés. D'une manière générale, les premières sessions de pratique sont caractérisées par l'adoption d'une fonction d'amortissement de Rayleigh, à laquelle se substitue par la suite une fonction d'amortissement de type van der Pol. Cette expérimentation confirme les propositions de Newell (1991) considérant que l'apprentissage doit être appréhendé comme un processus discontinu et non-linéaire. Plusieurs points intéressants ont été relevés.

Tout d'abord, les comportements tendent à se linéariser tout au long de la pratique. L'introduction de termes non-linéaires dans la fonction de raideur a pour principale conséquence de mollir l'oscillateur et de donner ainsi plus de temps au sujet pour contrôler les points de revirement. Mottet et Bootsma (1999) observent dans la modélisation de la tâche de

Fitts que l'augmentation de l'indice de difficulté s'accompagne d'une augmentation des valeurs absolues du coefficient de raideur non-linéaire. Ainsi, si l'on convient du fait que le sujet débutant en simulateur de ski se retrouve devant une tâche difficile, on peut caractériser la progressive perte de non-linéarité comme l'accès à l'expertise.

De plus, on a pu constater que la période précédant la transition vers un autre mode de comportement, était marquée par une augmentation de la fréquence d'oscillation. Nous avons évoqué précédemment les raisons, plutôt les conditions permettant cette augmentation de la fréquence. Peut-on de ce fait, considérer la fréquence comme un paramètre de contrôle qui conditionne la transition vers un autre mode comportemental attracteur ? En début d'apprentissage il semble que le premier problème du sujet soit de contrôler son exécution surtout à l'approche du point de revirement. Durant cette période la fréquence d'oscillation reste relativement stable pour chaque sujet. Ce problème de contrôle étant surmonté, il est enfin possible de répondre à la consigne de départ (très générale) « osciller avec la plus amplitude et fréquence possible ». Nous avons pu constater que très tôt dans l'apprentissage les sujets ont atteint des valeurs d'amplitude expertes. Nous pensons donc qu'après le problème de contrôle dépassé, le sujet augmente sa fréquence, ce qui le contraint à adopter un autre mode de coordination lui permettant de conserver une amplitude élevée à haute fréquence d'oscillation. On sait que ces deux fonctions d'amortissements se distinguent dans les relations qu'elles induisent entre l'amplitude et fréquence. Dans le cas d'un amortissement van der Pol, l'amplitude est indépendante de la fréquence. Par contre, pour un amortissement Rayleigh, l'accroissement de la fréquence tend à réduire l'amplitude. Il semblerait que lorsque le sujet parvient à mieux maîtriser le point de revirement, le mollissement de la raideur à l'approche du revirement ne soit plus nécessaire. La fréquence peut donc s'exprimer. Mais dans ce cas de figure le comportement de Rayleigh n'est plus viable car l'augmentation de la fréquence entraînerait une augmentation de l'amplitude qui est manifestement impossible du fait que les sujets ont déjà atteint les valeurs expertes d'amplitudes. La seule solution est donc de basculer vers un autre type de comportement. C'est en ce sens que l'adoption d'un comportement de type van der Pol semble pertinente car lui, est indépendant du facteur fréquence. C'est en ce sens que nous pouvons considérer que la fréquence constitue un paramètre de contrôle pour l'évolution des modes de coordination, mais qu'elle ne peut jouer son rôle qu'après la résolution du problème de contrôle des degrés de liberté. Ceci va dans le sens des propositions de Bernstein (1967) qui considère que la première étape de

l'apprentissage s'organise autour du contrôle des degrés de liberté afin de permettre une optimisation de la tâche en dernière étape

Enfin, on a pu constater que la transition entre les deux modes de comportement s'opérait de façon progressive. La littérature scientifique actuelle, rend largement compte du problème de transition de phase au travers du concept plus général d'auto-organisation (Ruelle, 1992, Bergé *et al.*, 1988, Clergue, 1997). Dans le domaine de l'apprentissage et du contrôle moteur, ce concept est à présent reconnu et suscite de nombreuses recherches. Après avoir caractérisé pour la première fois une transition de phase entre deux états stables de la dynamique intrinsèque pour les tâches bi-manuelles (Haken, *et al.*, 1985), les recherches se sont également portées sur l'acquisition d'un nouveau pattern et sur les conditions et caractéristique de son apprentissage (Zanone & Kelso, 1992). Mais au regard de la somme d'étude concernant cette problématique, on peut regretter que très peu d'entre elles ne tentent d'étudier les transitions de phase qui peuvent exister dans l'apprentissage d'un nouveau pattern ne bénéficiant pas d'apport d'information comportementale ni de retour d'information augmenté de différents types. Il nous semble que ce constat, constitue un des points faibles de l'approche dynamique de l'apprentissage et du contrôle moteur, et justifie le manque d'observations et d'explication de transition de phase pouvant s'opérer de façon progressive. Il semblerait que l'on constate une transition de phase abrupte lorsque les deux attracteurs sont déjà présents dans l'espace de travail. Ainsi l'on constate bien une transition brutale et nette du pattern 180° vers le pattern 0° mais ces deux attracteurs font initialement partie de la dynamique intrinsèque du système (Zanone & Kelso, 1992). Au vu de nos résultats et des présupposés théoriques qui sous-tendent notre étude, pouvons-nous affirmer que lors de l'apprentissage d'une nouvelle habileté, sans l'apport de consigne particulière, il s'opère des transitions de phase progressives entre les différents modes attracteurs? Il est question de rester prudent et d'approfondir spécifiquement ce problème. Bien que l'on attribue généralement une acception abrupte au concept de transition de phase, Bok (1983 ; in Dumouchel et Dupuy, 1983) en distingue deux types : la transition de premier et de second ordre. La transition de phase de premier ordre se caractérise par un changement net entre deux états stables. Elle correspond par exemple à la transition solide/liquide. La transition de second ordre pose pour sa part plus de problème car elle se caractérise par un état de trouble ou « d'opalescence critique » dans lequel on constate de grandes fluctuations entre les états du système (par exemple un gaz pris dans certaines conditions, n'est plus vraiment gazeux ni vraiment liquide). Nous suggérons que nos résultats rendent compte d'une transition de

second ordre. Durant une certaine période, on constate une perte de la stabilité du comportement de type Rayleigh au travers d'une baisse fluctuante de la valeur absolue de son coefficient, qui coïncide avec l'apparition de termes de la fonction d'amortissement de type de van de Pol se situant aussi à des valeurs absolues proche de zéro. On se trouve dans une zone de bi-stabilité dans laquelle le système oscille entre les deux attracteurs avant de basculer et ce façon définitive vers le deuxième mode.

Nous évoquons dans notre partie introductive à cette étude les quatre termes nous semblant fondamentaux, pour rendre compte de l'apprentissage : le processus, la stabilité, le changement et la pratique. Nos différents résultats semblent confirmer l'importance des ces facteurs dans l'acquisition d'une habileté nouvelle. En accord avec Newell,(1991) et Lee, (1998), l'apprentissage apparaît comme un processus l'évolution dynamique non-linéaire des coordinations, marqué par des discontinuités en raison des profondes réorganisations qualitatives des comportements. De plus, la pratique d'une durée suffisamment longue, se trouve être absolument nécessaire pour permettre l'évolution qualitative des patterns de coordinations. Chaque mode de coordination se distingue par une grande stabilité avant d'entrer dans une période de fluctuation à l'approche de la transition vers le mode qui lui succède. Enfin, cette transition s'opère de manière progressive au travers d'une période de grande fluctuation où le système oscille entre les deux modes de comportements en présence. A présent nous nous risquerions à considérer que l'apprentissage moteur d'une nouvelle habileté complexe s'opère au travers d'un processus dynamique non-linéaires de stabilisation et de transition progressive, entre différents modes comportementaux attracteurs, durant une période relativement longue de pratique.

Nous avons soulevé tout de même de nombreuses zones d'ombre lors de ce travail, nous laissant envisager de fructueuses perspectives.

Tout d'abord, les résultats de notre étude sur la caractérisation des coordinations spontanées nous suggère d'envisager le rôle de l'enseignant plus en terme d'aide pour quitter un premier comportement attracteur. Cette suggestion, confortée par les travaux de Swinnen et Walter (1992), entraîne la nécessité d'identifier d'une part, le paramètre de contrôle spécifique et pertinent pour la tâche et de le manipuler d'autre part, afin de réduire le pouvoir attractif de la coordination en présence. Le problème premier serait donc l'identification du bon paramètre de contrôle. La littérature concernant les taches bi-manuelles, rend généralement compte du paramètre de contrôle pertinent en terme de fréquence d'oscillation

(par exemple : Haken *et al.*,1985 ; Zanone & Kelso, 1992). Dans le cadre des études sur les transitions d'allure dans la locomotion, la vitesse de déplacement a été identifiée comme paramètre de contrôle pertinent (Brisswalter & Mottet, 1996). Il nous semble donc que la notion de vitesse dans toutes ses acceptions, soit intéressante pour expliquer la transition d'un pattern à un autre. A notre connaissance, aucune expérimentation à ce jour n'a entrepris une étude comparative d'apprentissage d'habileté complexe en manipulant le paramètre de contrôle. Nous nous proposons donc d'étudier l'évolution des coordinations dans l'apprentissage d'habiletés complexes, sous l'influence de consignes et/ou d'aménagements matériels suscitant une évolution d'un paramètre de contrôle précédemment identifié. On peut par exemple faire l'hypothèse que l'apprentissage d'une habileté gymnique telle que la roue au sol pourrait bénéficier de l'imposition d'une vitesse initiale de déplacement élevée. Eclairés par les travaux de Swinnen et Walter (1992) et par nos résultats de modélisation de l'évolution des coordinations qui soulignent le rôle que pourrait jouer la fréquence dans la transition vers un autre comportement qualitativement différent, nous faisons l'hypothèse que la manipulation du paramètre de contrôle de vitesse en terme de réduction en début de pratique puis d'augmentation progressive, permettra un apprentissage plus précoce de l'habileté étudiée.

Ensuite, une investigation toute particulière sur les transitions de phase nous semblerait intéressante. Notre étude longitudinale, nous a révélé une bifurcation progressive entre nos deux modèles comportementaux. Les études dans le cadre de l'acquisition d'une habileté complexe (ou non) ne relatent pas un tel phénomène. Une étude de Kruse, Carmesin, Pahlke, Strüber et Stadler (1996) a noté une transition de phase continue entre différentes perceptions de mouvements alternatifs au stroboscope, lors de l'augmentation du paramètre de contrôle de fréquence de présentation. Ce type de résultat reste tout de même très isolé et ne concerne pas le mouvement corporel. Face au manque de supports théoriques pour rendre compte de ce phénomène de continuité dans la bifurcation, nous envisageons de nous orienter vers différentes directions d'investigation. Tout d'abord, il serait bien entendu nécessaire de réitérer de tels résultats avant de projeter une quelconque ligne de recherche les concernant. Ensuite, les recherches actuelles dans le paradigme des mathématiques du chaos, nous enseignent qu'il existe en effet, des transitions non abruptes, caractérisées par une période de trouble où la fluctuation entre deux états s'installent pour une certaine période. L'explication de ce phénomène peut-être faite par la procédure de *renormalisation*. La renormalisation ou la loi d'échelle « consiste à regarder comment la description d'un système varie selon

l'échelle à laquelle on l'observe » (Bok, 1983 in Dumouchel et Dupuy, 1983). On peut ainsi parvenir à observer des invariants indépendamment de l'échelle d'observation. Il nous semble que cette procédure nous permettrait de caractériser plus finement la période de fluctuations, de régime bi-stable que nous avons observé. Enfin, comme le suggérait déjà Vereijken (1991) dans les perspectives de sa thèse, une étude de la stabilité de la phase relative en calculant l'exposant de Lyapunov, pourrait nous renseigner sur l'évolution du caractère chaotique (ou non) des patterns de coordinations et de leurs fluctuations durant la période de transition de phase. Mais il semblerait que cette ligne de recherche pose certains problèmes de faisabilité. En effet, s'il est facile d'évaluer l'exposant de Lyapunov dans des simulations numériques cette démarche est beaucoup plus délicate pour des données expérimentales en raison de l'incertitude des mesures et du bruit expérimental (Bergé *et al*, 1988). Et pourtant une étude de Yamada (1995) s'est intéressée à la dynamique des attracteurs du centre de pression de la posture par l'intermédiaire du calcul de l'exposant premier de Lyapunov. Cette expérimentation révèle que les deux conditions de maintien de posture (l'une immobile et l'autre avec balancements des membres supérieurs) se caractérisent par des attracteurs chaotiques et un exposant de Lyapunov plus important pour la condition avec balancement des bras. Cette étude nous incite à utiliser cette méthode d'investigation pour tenter d'évaluer le caractère chaotique des périodes encadrant la transition de phase, tout en gardant à l'esprit les limites qu'elle présente en terme d'exactitude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adams, J.A. (1971). A closed loop theory of motor learning. *Psychological Bulletin*, **70**, 486-504.
- Annett, J. & Kay, H. (1957). Knowledge of results and skilled performance. *Occupational Psychology*, **31**, 69-79.
- Barnett, M.L. & Staniceck, J.A. (1979). Effect of goal setting on achievement in archery. *Research Quarterly*, **50**, 328-332.
- 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. & Stegeman, D.F. (1995). Dynamical Models of Movement Coordination. *Human Movement Science*, **14**, 573-608.
- 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
- Beek, P.J., Rikkert, W.E.I. & van Wieringen, P.C.W. (1996). Limit cycle properties of rhythmic forearm movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**, 1077-1093.
- Beek, P.J., Schmidt, R.C., Morris, A.W., Sin, M.Y., & Turvey, M.T. (1995). Linear and nonlinear stiffness and friction in biological rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, **73**, 499-507.
- Beek, P.J., Turvey, M.T. & Schmidt, R.C. (1992). Autonomous and nonautonomous dynamics of coordinated rhythmic movements. *Ecological Psychology*, **4**, 65-95.
- Bergé, P., Pomeau, Y. & Dubois-Gance (1994). *Des rythmes au chaos*. Paris: Odile Jacob
- Bergé, P., Pomeau, Y. & Vidal, Ch. (1988). *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence*. Paris: Hermann.
- Bernstein, N.A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.

- Bilodeau, E.A. & Bilodeau, I.M. (1958). Variable frequency of knowledge of results and the learning of a simple skill. *Journal of Experimental Psychology*, **55**, 379-383
- Bonnard, M. & Pailhous, J. (1993). Intentionality in human gait control: Modifying the frequency-to-amplitude relationship. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **19**, 429-443.
- Bonnet, M., Guiard, Y. Requin, J. & Semjen, A. (1994). Mécanisme généraux de la motricité. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 587-656). Paris: PUF.
- Dumouchel, P & Dupuy, J-P. (1983). *Colloque de Cerisy : L'auto-organisation : de la physique au politique*. Paris: Seuil.
- Boyce, B.A. & Wayda, V.K. (1994). The Effects of Assigned and Self-set Goals on Task Performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, **16**, 258-269.
- Bril, B. (1986). Motor development and cultural attitudes. In H.T.A. Whiting & M.G. Wade (Eds.), *Themes in Motor Development* (pp. 297-313). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Bril, B. (1986). The acquisition of an everyday technical motor skill: the pounding of cereal in Mali. In H.T.A. Whiting & M.G. Wade (Eds.), *Themes in Motor Development* (pp. 297-313). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- 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*. Thèse de doctorat S.T.A.P.S. Spécialité : Sciences de la Vie et de la Santé, Université de Paris V
- 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
- Catalano, J.F. & Kleiner, B.M. (1984). Distant transfer in coincident timing as a function of variability of practice. *Perceptual and Motor Skills*, **58**, 851-856.
- Chatillon, J.F. & Baldy, R. (1994). Performance motrice et développement moteur, les liens au développement cognitif. *Enfance*, **2-3**; 299-319.

- Clark, J.E., Truly, T.L., & Phillips, S.L. (1993). On the development of walking as a limit cycle system. In L.B. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic systems approach to development* (pp. 71-93). Cambridge, MA: MIT Press.
- Clark, J. E. (1995). On becoming skillful: patterns and constraints. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **66**, 3, 173-183
- Clergue, G. (1997). *L'apprentissage de la complexité*. Paris: HERMES.
- Cooper, L.K. & Rothstein, A.L. (1981). Videotape replay and the learning of skill in open and closed environments. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **52**, 191-199.
- Cordier, P., Dietrich, G. & Pailhous, J. (1996). Harmonic analysis of a complex motor behavior. *Human Movement Science*, **15**, 789-807.
- Corlett, E.N. & Mahadeva, K. (1970). A relationship between a freely chosen working pace and energy consumption curves. *Ergonomics*, **13**, 517-524.
- 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.
- Delignières, D, Geoffroi, V., Nourrit, D. & Durand, M. (1996). *Energy expenditure and efficiency in the learning of complex cyclical task*. Communication au First Annual Congress of European College of Sports Science. Nice, 28-31 mai
- Delignières, D. & Nourrit, D. (1997). Neuere Entwicklungen und aktuelle Perspektiven der Forschung zum Motorischen Lernen in Frankreich. In G. Treutlein & C. Pigeassou (Eds.), *Sportwissenschaft in Deutschland und Frankreich* (pp. 133-146). Hamburg: Czwalina Verlag.
- 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**, 221-241.
- de Montpellier, G. (1964). L'apprentissage. In P. Fraise & J. Piaget (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (vol. IV). Paris : P.U.F.

- den Brinker, B.P.L.M., Stäbler, J.R.L.W. & Vergeer, I. (1984). *De relatie tussen het lichaamsgewicht en bewegingstempo bij het bewegen op een ski-simulator*. Internal Report, Departement of Psychology, IFLO, The Free University, Amsterdam.
- den Brinker, B.P.L.M., Stäbler, J.R.L.W., Whiting, H.T.A. & van Wieringen, P.C.W. (1985). A multidimensional analysis of some persistent problems in motor learning. In D. Goodman, R.B. Wilberg & J.M. Franks (Eds.), *Differing Perspectives in Motor Learning, Memory, and Control* (pp. 193-207). Amsterdam: North-Holland.
- den Brinker, B., Stäbler, J., Whiting, H. & van Wieringen, P. (1986). The effect of manipulating knowledge of results on the learning of slalom-type ski movement. *Ergonomics*, **29**, 31-40.
- Durand, M. (1992a). L'optimisation de la performance. Etude dans les tâches constituant une sollicitation optimale. *STAPS*, **27**, 7-19
- Durand, M. (1992b). L'optimisation de la performance. Etude dans les tâches constituant une sollicitation non optimale. *STAPS*, **28**, 41-57.
- Durand, M. (1993). Apprentissage, stratégies de recherches et optimisation de la performance. In J-P. Famose (Ed.), *Cognition et Performance* (pp. 61-78). Paris: INSEP Publications.
- 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**, 785-799.
- 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.
- French, K.E., & Thomas, J.R. (1987). The relation of knowledge development to children's basketball performance. *Journal of Sport Psychology*, **9**, 15-32.
- Glencross, D.J., Whiting, H.T.A. & Abernethy, B. (1994). Motor Control, Motor Learning and the Acquisition of Skill: Historical Trends and future Directions. *International Journal of Sport Psychology*, **25**, 32-52.

- Geoffroi, V., Delignières, D. & Durand, M. (1995). *Learning strategies and energy correlates in a complex cyclical self-paced skill acquisition*. Communication présentée au IXth European Congress on Sport Psychology, Bruxelles
- Giordan, A. (1993). De l'usage des conceptions dans les apprentissages. In G. Bui-Xuan & J. Gleyse (Eds.), *Enseigner l'Education Physique et Sportive* (pp. 241-240). Clermont-Ferrand: AFRAPS.
- Gonzalez, D.L., & Piro, O. (1987). Global bifurcations and phase portrait of an analytically solvable nonlinear oscillator: Relaxation oscillations and saddle-node collision. *Physical Review A*, **36**, 4402-4410
- Guiard, Y. (1993). On Fitts's and Hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica*, **82**, 139-159.
- Hall, H.K., Weinberg, R.S. & Jackson, A. (1987). Effects of goal specificity, goal difficulty, and information feedback on endurance performance. *Journal of Sport Psychology*, **9**, 43-54.
- 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.
- Haken, H. (1983). *Advanced synergetics*. Berlin: Springer Verlag.
- Haken, H., Kelso, J.A.S. & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transition in human hand movement. *Biological Cybernetics*, **51**, 347-356.
- Higgins, S. (1985). Movements as an emergent form: its structural limits. *Human Movement Science*, **4**, 119-148.
- Higgins, J.R. & Spaeth, R.K. (1972). Relationship between consistency of movement and environmental condition. *Quest*, **17**, 61-69.
- Hoffman, S.J. (1974). Effect of practice on consistency in performance technique: a cinematographic study. *Journal of Motor Behavior*, **6**, 125-129.
- 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. *Medicine 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.
- Husak, W.S., Cohen, M.J. et Schandler, S.L. (1991). Activation peaking during the acquisition of a motor task under high and low contextual-interference conditions. *Perceptual and Motor Skills*, **72**, 1075-1088.
- Kamon, E. & Gormley, J. (1968). Muscular Activity Pattern for Skilled Performance and During Learning of a Horizontal Bar Exercise. *Ergonomics*, **11**, 345-357.
- 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**, 178-192.
- Kelso, J.A.S (1995). *Dynamics patterns: the self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Kelso, J.A.S., DeGuzman, G.C. & Holroyd, T. (1991). The self-organized phase attractive dynamics of coordination. In A. Babloyantz (Ed.), *Self-organization, Emerging Properties, and Learning* (pp 41-62). NY: Plenum.
- 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. & Jeka, J.J. (1992). Symmetry breaking dynamics of multilimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 645-668.
- Kelso, J.A.S. & Norman, P.E. (1978). Motor schema formation in children. *Developmental Psychology*, **14**, 153-156.
- Kelso, J.A.S. & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, **7**, 27-46.
- Kerr, R. & Booth, B. (1978). Specific and varied practice of motor skills. *Perceptual and Motor Skills*, **46**, 395-401.

- Kruse, P. Carmesin, H.O., Pahlke, L., Strüber, D. & Stadler, M. (1996). Continuous phase transitions in the perception of multistable visual patterns. *Biological Cybernetics*, **75**, 321-330.
- 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., Kelso, J.A.S. & Turvey, M.T. (1982). On the control and co-ordination of naturally developing systems. In J.A.S. Kelso & J.E. Clark (Eds.), *The Development of Movement Control and Co-ordination* (pp. 5-77). New York: Wiley.
- Kugler, P.N. & Turvey, M.T. (1987). *Information, Natural Law, and the Self-assembly of Rhythmic Movement*. Hillsdale, NJ :Erlbaum
- 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**, 51-59.
- 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.
- Lee, T.D. (1998). On the Dynamics of Motor Learning Research. Hot Topics in Motor Control and Learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **69**, 334-337
- Magill, R.A. (1973). The post-K.R. interval : time and activity effects and relationship of motor short term memory theory. *Journal of Motor Behavior*, **5**, 49-56.
- Magill, R.A. & Hall, K.G. (1990) A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science*, **9**, 241-289.
- Magill, R.A. & Schoenfelder-Zohdi, B. (1995). Interaction entre les informations en provenance d'un modèle et la connaissance de la performance lors d'un apprentissage moteur. In Bertsch, J., Le Scanff, C. (Eds.), *Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissage* (pp. 15-26). Paris: P.U.F.
- Marteniuk, R.G. & Romanov, S.K.E. (1983). Human movement organization and learning revealed by variability of movement, use of kinematic information, and Fourier

- analysis. In R.A. Magill (Ed.), *Memory and control of action* (pp. 167-197). Amsterdam: North Holland.
- Mauss, M. (1950). *Sociologie et anthropologie*. Paris: Quadrige/ PUF.
- Mottet, D. & Bootsma, R.J. (1999). Movement dynamics in a bi-dimensional Fitts' task. In M.A. Grealy & J.A. Thomson (Eds.), *Studies in Perception and Action V* (pp. 306-309). New York: Erlbaum.
- Muzii, R.A., Lamm Warburg, C. & Gentile, A.M. (1984). Coordination of the upper and lower extremities. *Human Movement Science*, **3**, 337-354.
- Newell, K.M. (1976). Knowledge of results and motor learning. In J. Keogh & R.S. Hutton (Eds.), *Exercise and Sport Sciences Reviews 4* (pp. 195-228). Santa Barbara : Journal Publishing Affiliates
- Newell, K.M. (1985). Coordination, Control and Skill. In D. Goodman, R.B. Wilberg & I.M. Franks (Eds.), *Differing Perspectives in Motor Learning* (pp. 295-317). Amsterdam: North-Holland.
- Newell, K.M. (1986). Constraints on the developpement of coordination. In M.G. Wade & H.T.A. Whitting (Eds.), *Motor Development in Children : Aspects of Coordination and Control*. (pp.341-360). Dordrecht : Nijhoff.
- Newell, K.M. (1991). Motor Skill Acquisition. *Annual Review of Psychology*, **42**, 213-237.
- Newell, K.M., Kugler, P.N., van Emmerik, REA & McDonald, P.V. (1989). Search strategies and the acquisition of coordinations. In S.A. Wallace (Ed.), *Perspectives on the coordination of movement* (pp. 85-122). North-Holland: Elsevier.
- Newell, K.M. & Walter, C.B. (1981). Kinematic and kinetic parameters as information feedback in motor skill acquisition. *Journal of Human Movement Studies*, **7**, 235-254.
- Nourrit, D., Caillou, N., Deschamps, T., Lauriot, B. & Delignières, D. (1999). *Expertise et invariance spatio-temporelle : une comparaison experts-novices en bowling*. Communication présentée au VIII^o Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives, Macolin, 31 Octobre-3 Novembre 1999.
- 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. (1995). Coupling Strength in tapping a 2:3 polyrhythm. *Human Movement Science*, **14**, 217-245.
- Peper, C.E., Beek, P.J. & van Wieringen, P.C.W. (1995). Multifrequency coordination in bimanual tapping : Asymmetrical coupling and signs of supercriticality. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, **21**, 1117-1138.
- Peper, C.L., Beek, P.J. & van Wieringen, P.C.W. (1995). Frequency-induced phase transitions in bimanual tapping. *Biological Cybernetics*, **73**, 301-309.
- Piard, C. (1993). Les concepts du socio-cognitivism. In G. Bui-Xuan & J. Gleyse (Eds.), *Enseigner l'Education Physique et Sportive* (pp. 217-225). Clermont-Ferrand: AFRAPS.
- Pigott, R.E. & Shapiro, D.C. (1984). Motor schema: the structure of the variability session. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **55**, 41-45.
- Prigogine, I. (1993). *Les lois du chaos*. Paris : Flammarion
- Reed, E.S. (1993). The intention to use a specific affordance: a conceptual framework for psychology. In R.K. Wosniak & K.W. Fischer (Eds.), *Development in context: action and thinking in specific environments* (pp.45-76). Hillsdale, NJ : Erlbaum
- Reuchlin, M. (1977). *Psychologie*. Paris : P.U.F.
- Ruelle, D. (1991). *Hasard et chaos*. Paris: Odile Jacob
- Salvendy, G. (1972). Physiological and psychological aspects of paced performance. *Acta Physiologica, Academia Scientiarum Hungaricae*, **42**, 267-275.
- Schmidt, R.A. (1982). *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. Champaign : Human Kinetics Publishers.
- Schmidt, R.A.(1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris: Vigot.
- Schneider, W. & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention. *Psychological Review*, **84**, 1-66.
- Schöner, G. (1990). A dynamic theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, **63**, 257-270.

- Schöner, G. & Kelso, J.A.S. (1988). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, **135**, 501-524.
- Schöner, G., Zanone, P.G. & Kelso, J.A.S. (1992). Learning as Change of Coordination Dynamics: Theory and Experiment. *Journal of Motor Behavior*, **24**, 29-48.
- Shea, C.H., & Kohl, R.M. (1990). Specificity and variability of practice. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **61**, 169-177.
- Shea, C.H. & 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.
- Smith, T. (1991). *Biomécanique et gymnastique*. P.U.F.: Paris
- Sparrow, W.A. (1983). The efficiency of skilled performance. *Journal of Motor Behavior*, **15**, 237-261.
- 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**, 240-264.
- Sparrow, W.A., Hughes, 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.
- Spray, J.A. & Newell, K.M. (1986). Time series analysis of motor learning: KR versus no-KR. *Human Movement Science*, **5**, 59-74.
- Steenbergen, B., Marteniuk, R.G. & Kalbfleisch, L.E. (1995). Achieving coordination in prehension: joint freezing and postural contributions. *Journal of Motor Behavior*, **27**, 333-348.
- Summers, J.J., Ford, S.K. & Todd, J.A. (1993). Practice effects on the coordination of the two hands in a bimanual tapping task. *Human Movement Science*, **12**, 111-133.
- Swinnen, S.P. (1996). Information feedback for motor skill learning: a review. In H.N. Zelaznik (Ed.), *Advances in Motor Learning and Control* (pp. 37-66). Champaign, Il.: Human Kinetics

- Swinnen, S.P., de Pooter, A. & Delrue, S. (1991). Moving away from the in-phase attractor during bimanual oscillation. In Beek, P.J., Bootsma, R.J., van Wieringen, P.C.W. (Eds.), *Studies in Perception and Action* (pp. 315-319). Amsterdam: Rodopi.
- Swinnen, S.P.; Dounskaia, N., Walter, C.B. & Serrien, D.J (1997). Preferred and induced coordinations modes during the acquisition of bimanual movement with a 2:1 frequency ratio. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 1087-1110.
- Swinnen, S.P., Jardin, K. & Meulenbroek, R. (1996a). Between-limb asynchronies during bimanual coordination: Effects of manual dominance and attentional cueing. *Neuropsychologia*, **34**, 1203-1213.
- 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.
- Swinnen, S., Walter, C.B. & Shapiro, D.C. (1988). The coordination of limb movement with different kinematic patterns. *Brain and Cognition*, **8**, 326-347
- Swinnen, S.P., Walter, C.B., Lee, T.D. and Dounskaia, N. (1996). *The organization and control of new patterns of interlimb coordination against the backdrop of preexisting preferred coordination modes*. Communication présentée au First Annual Congress of the European College of Sport Sciences, Nice, May 28-31, 1996.
- Temprado, J.J, Della-Graza, M., Farrell, M. & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (intra-limb) coordination subserving the volley-ball serve. *Human Movement Science*, **16**, 653-676.
- Thines, G. & Lempereur, A. (1975). *Dictionnaire général des sciences humaines*. Paris: Editions Universitaires.
- van Emmerick, 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. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **41 A**, 251-262.
- Vereijken, B. (1991). *The dynamics of skill acquisition*. Amsterdam: Free University of Amsterdam.

- Vereijken, B., van Emmerick, R.E.A., Bongaardt, R., Beek, W.J. & Newell, K.M. (1997). Changing coordinative structures in complex skill learning acquisition. *Human Movement Science*, **16**, 823-844.
- Vereijken, B., van Emmerick, R.E.A., Whiting, H.T.A. & Newell, K.M. (1992a). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, **24**, 133-142.
- Vereijken, B. & Whiting, H.T.A. (1990). In defence of discovery learning. *Canadian Journal of Sport Psychology*, **15**, 99-106.
- Vereijken, B., Whiting, H.T.A. & Beek, W.J. (1992b). A dynamical system approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **45A**, 323-344.
- 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.
- Wall, A.E., McClements, J., Bouffard, M. Findlay, H. & Taylor, M.J. (1985). A knowledge-based approach to motor development: Implications for the physically awkward. *Adapted Physical Activity Quarterly*, **2**, 21-42.
- 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. (1992). Adaptive tuning of interlimb attraction to facilitate bimanual decoupling. *Journal of Motor Behavior*, **24**, 95-104.
- Walter, C.B. & Swinnen, S.P. (1994). The formation of "bad habits" during the acquisition of coordination skills. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion and P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical and cognitive constraints* (pp. 491-513). New York: Academic Press.
- Warren, W.H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance in stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, **10**, 683-703.
- Weinberg, R., Bruya, L., Longino, J. & Jackson, A. (1988). Effect of goal proximity and specificity on endurance performance of primary-grade children. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, **10**, 81-91.

- 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**, 163-175
- Whitall, J. & Getchell, N. (1996). Multilimb coordination patterns in simultaneous, dissimilar upper and lower limb tasks. *Human Movement Science*, **15**, 129-155.
- 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 (Eds.), *Approaches to the study of motor and learning* (pp.81-111). Elsevier
- Whiting, H.T.A. & Vereijken, B.(1993). The Acquisition of Coordination in Skill Learning. *International Journal of Sport Science*, **24**, 343-357.
- Winter, D.A. (1990). *Biomechanics of motor control and Human Movement*. (2nd Ed.). New York: Wiley.
- Wrisberg, C.G. (1991). A field test of the effect of contextual variety during skill acquisition. *Journal of Teaching in Physical Education*, **11**, 21-30.
- Wulf, G., Höß, M. & Prinz, W. (1998). Instructions for motor learning : Differential effects of internal versus external focus of attention. *Journal of Motor Behavior*, **30**, 169-179.
- Wulf, G., Hörger, M. & Shea, C.H. (1999). Benefits of Blocked over Serial Feedback on Complex Motor Skill Acquisition. *Journal of Motor Behavior*, **31**, 1, 95-103
- Wulf, G & Lee, T.D. (1993). Contextual interference effects in movements of the same class: Differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behavior*, **25**, 254-263.
- Wulf, G. & Schmidt, R.A. (1997). Variability of practice and implicit motor learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, **23**, 987-1006.
- Wulf, G. & Weigelt, C. (1997). Instructions about physical principles in learning a complex motor skill: to tell or not to tell... *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **68**, 362-367.
- Yamada, N. (1995). Chaotic swaying of the upright posture. *Human Movement Science*, **14**, 711-726.

- Zaal, F.T.J.M., Bootsma, R.J. & van Wieringen, P.C.W. (1998). Coordination in prehension. Information-based coupling of reaching and grasping. *Experimental Brain Research*, **119**, 427-435.
- Zanone, P.G. & Kelso, J.A.S. (1992). Evolution of Behavioral Attractors with Learning: Nonequilibrium Phase Transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **18**, 403-421.
- Zanone, P.G. & Kelso, J.A.S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **23**, 1454-1480.

Résumé:

Titre: Etude de l'évolution des coordinations dans l'acquisition des habiletés complexes.

Ce travail constitue une contribution à la compréhension des principes dynamiques sous-tendant l'acquisition d'une nouvelle habileté complexe. Notre objectif consistait en la caractérisation de l'organisation et de l'évolution des différentes coordinations adoptées par le sujet novice durant une période d'apprentissage. Tout d'abord au travers d'une tâche oscillatoire complexe (les balancers en position mi-renversée aux barres parallèles), nous avons pu caractériser les premiers modes de coordination adoptés par le sujet en terme de synchronisation absolue des phases et des fréquences. La stabilité et la persistance de ce pattern de coordination, nous a amenés considérer qu'il participait de la dynamique intrinsèque du système. Par la suite, une série d'expérimentation sur une autre tâche oscillatoire (les oscillations au simulateur de ski), nous a permis de relever que : (1) la contrainte de l'amplitude requise pour l'exécution de la tâche canalise les stratégies de recherche d'optimalité dans le sens où elle induit une convergence des fréquences d'oscillation entre les sujets et une stabilité de la fréquence pour chaque sujet. Mais elle ne constitue pas de bénéfice substantiel pour l'apprentissage de l'habileté,(2) l'évolution de la plate-forme du simulateur de ski au travers de sa modélisation mathématique se caractérise par une forte raideur non-linéaire et une fonction d'amortissement de type Rayleigh. La modélisation du comportement constitue, en ce sens, une variable collective pertinente, (3) l'évolution des coordinations lors d'une pratique prolongée (13 semaines) s'opère de manière discontinue, avec de profondes réorganisations qualitatives du comportement. On distingue deux étapes : la première se caractérise par une faible fréquence d'oscillation, une raideur fortement non-linéaire, une fonction d'amortissement de type van der Pol et une stratégie de forçage de la plate-forme dite « novice » est une seconde étape marquée par une fréquence plus élevée, une linéarisation de la raideur, une fonction d'amortissement de type van der Pol et une stratégie de forçage dite « experte ».

Mots clés: Approche dynamique, Apprentissage, Habiletés complexes, Coordinations spontanées, Modélisation.

Abstract:

Title : The evolution of coordination modes during the acquisition of complex skills.

This work aimed to contribute to the understanding of the underlying dynamics principles of the acquisition of a novel complex skill. Our goal was to analyze the organisation and evolution of novice's coordination modes during learning. First, we characterised the initial coordination modes, in a complex cyclical task (swings under the parallel bars in bent inverted hang position) in terms of absolute synchronisation of phases and frequencies. These patterns of coordination were stable and persistent, so we can consider that they correspond to the intrinsic dynamics of the system. Then, a series of experiments on another cyclical task (oscillations on a ski- simulator) pointed out that: (1) a high required amplitude tends to channel the search strategies and to induce a convergence and a higher stability of the frequencies; nevertheless this kind of constraint doesn't lead to any learning benefit. (2) The learning process was characterised by discontinuous qualitative changes in motor behavior. We identified two stages: the first one was distinguished by a low frequency of platform motion, a high non-linear stiffness, a Rayleigh damping function and a typical time of forcing on the platform, before the middle of the apparatus. The second stage revealed a higher frequency, a linearisation of the stiffness function, a van der Pol damping function and time of forcing occurring after the middle of apparatus.

Key words: Dynamical system approach, Learning, Complex skills, Spontaneous coordinations, Modelling.