

UNIVERSITE DE MONTPELLIER I
FACULTE DES SCIENCES DU SPORT ET DE L'EDUCATION
PHYSIQUE

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER I

ECOLE DOCTORALE : SCIENCES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES POUR LA SANTE

FORMATION DOCTORALE : SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

présentée par

Thibault DESCHAMPS

EFFETS DES CONTRAINTES MOTIVATIONNELLES ET
EMOTIONNELLES SUR LA DYNAMIQUE
DES COORDINATIONS MOTRICES

Soutenue le 18 décembre 2000 devant le jury composé de

Didier DELIGNIERES	PU, Université de Montpellier I	Directeur de thèse
Vincent NOUGIER	PU, Université de Grenoble I	Rapporteur
Jean-Jacques TEMPRADO	MCU, HDR, Université de la Méditerranée	Rapporteur
Alain VARRAY	PU, Université de Montpellier I	Examineur
Pier Giorgio ZANONE	PU, Université de Toulouse III	Examineur

Sommaire

Introduction	p. 5
Approche synergétique des systèmes dynamiques	p. 9
1- Introduction	p. 9
2- Système dynamique	p. 10
3- Importance qualitative de la non-linéarité	p. 12
4- La formation spontanée d'états ordonnés	p. 13
5- Degrés de liberté et complexité	p. 14
6- Les équations d'état	p. 15
7- Portrait des phases	p. 16
<i>7-1 Attracteurs</i>	p. 16
<i>7-2 Repellants</i>	p. 17
<i>7-3 Points-col</i>	p. 18
8- Les propriétés stochastiques d'un système dynamique	p. 18
9- Conclusion	p. 19
Approche dynamique des coordinations motrices	p. 21
1- Introduction	p. 21
2- Le système de contraintes	p. 22
3- Paradigme de la tâche bimanuelle d'oscillations rythmiques	p. 24
<i>3-1 Scott Kelso, le précurseur</i>	p. 24
<i>3-2 Stabilité, perte de stabilité, et fluctuations des coordinations bimanuelles</i>	p. 29
4- Modèles théoriques de transition de phase des coordinations bimanuelles	p. 31
<i>4-1 Le modèle " déterministe " de Haken, Bunz et Kelso (1985)</i>	p. 31
<i>4-2 Le modèle " stochastique " de Schöner, Haken et Kelso (1986)</i>	p. 34

<i>4-3 Le modèle cycle limite de Kay, Kelso, Saltzman et Schöner (1987)</i>	p. 38
<i>4-4 Le modèle des oscillateurs couplés de Haken, Kelso et Bunz (1985)</i>	p. 41
<i>4-5 Extensions du modèle stochastique de Schöner, Haken et Kelso (1986)</i>	p. 44
<i>4-6 Conclusions</i>	p. 46
5- L'information comportementale	p. 47
<i>5-1 Influence théorique de l'information comportementale</i>	p. 47
<i>5-2 Interprétations</i>	p. 48
6- Conclusions	p. 50
Partie expérimentale	p. 53
1- Influence des intentions sur la transition de phase dans la tâche de coordinations bimanuelles	p. 53
<i>1- 1 Introduction</i>	p. 53
<i>1- 2 Méthode</i>	p. 58
<i>1- 3 Résultats</i>	p. 63
<i>1- 4 Discussion</i>	p. 65
<i>1- 5 Conclusion</i>	p. 69
2- Influence de la force de l'intention sur le niveau de fluctuations des patterns intrinsèques de la tâche de coordination bimanuelle	p. 71
<i>2-1 Introduction</i>	p. 71
<i>2- 2 Méthode</i>	p. 76
<i>2-3 Résultats</i>	p. 80
<i>2-4 Discussion</i>	p. 84
<i>2-5 Conclusion</i>	p. 90

3- Détermination du niveau d'investissement intentionnel au cours de la réalisation du pattern en anti-phase à hautes fréquences d'oscillation	p. 92
<i>3-1 Introduction</i>	p. 92
<i>3-2 Méthode</i>	p.101
<i>3-3 Résultats</i>	p.102
<i>3-4 Discussion</i>	p.106
<i>3-5 Conclusion</i>	p.115
4- Influence de l'activation sur le phénomène de transition de phase et la stabilité des coordinations bimanuelles	p.117
<i>4-1 Introduction</i>	p.117
<i>4-2 Méthode</i>	p.121
<i>4-3 Résultats</i>	p.126
<i>4-4 Discussion</i>	p.129
<i>4-5 Conclusion</i>	p.134
5- Influence d'une situation stressante sur les fonctions de raideur et d'amortissement caractéristiques des coordinations motrices d'une tâche complexe, le simulateur de ski	p.136
<i>5-1 Introduction</i>	p.136
<i>5-2 Méthode</i>	p.139
<i>5-3 Résultats</i>	p.141
<i>5-4 Discussion</i>	p.144
<i>5-5 Conclusion</i>	p.147
Conclusion générale	p.148
Bibliographie	p.156
Table des matières	p.181

Introduction

Les problèmes posés par l'acquisition et le contrôle des habiletés motrices, en particulier la gestion des multiples degrés de libertés qui les caractérisent (Bernstein, 1967; Kugler & Turvey, 1987; Vereijken, 1991), ont reçu dans le cadre des modèles dynamiques non linéaires une nouvelle lecture. Ces modèles postulent que le comportement d'un système complexe émerge de l'interaction des contraintes qui pèsent sur lui, c'est-à-dire l'ensemble des facteurs susceptibles de réduire sa dimensionnalité d'action. Ainsi en étudiant l'évolution du système à un niveau macroscopique, l'approche dynamique offre une nouvelle perspective d'analyse du comportement moteur pour répondre à un des enjeux majeurs dans le domaine des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives : la description et la compréhension des aspects *qualitatifs* des coordinations motrices.

En plaçant le comportement moteur sous le contrôle d'une instance supérieure, au niveau de laquelle divers processus de traitement de l'information sous-tendraient sa production et son efficacité, les différents modèles de la psychologie cognitive (Adams, 1975; Schmidt, 1975; 1988) n'ont guère permis d'appréhender les problématiques qualitatives des coordinations motrices (Bonnet, Guiard, Requin & Semjen, 1994). L'amélioration du traitement de l'information, analysée par la mesure d'un temps de réaction ou d'un pourcentage d'erreurs, ne peut être représentative de la qualité de la coordination motrice, dans sa globalité. Au mieux, ces diverses variables dépendantes rendent compte de la vitesse de réponse et de l'optimisation des opérations réalisées au cours des différentes étapes du système de traitement de l'information.

En réponse à ces approches unidimensionnelles et quantitatives de la performance motrice, les théories dynamiques (Kelso, 1995) se proposent de décrire qualitativement le comportement moteur en se plaçant résolument à un niveau de description global et collectif. Issue des principes de la synergetique (Haken, 1983), l'approche dynamique soutient que tout système complexe s'auto-organise sous l'influence interactive des multiples contraintes qui pèsent sur son fonctionnement. Ainsi, Walter, Swinnen, Corcos, Pollatou et Pan (1997) définissent toute coordination motrice comme étant le résultat d'un ordre spatio-temporel émergeant de ce processus d'auto-organisation, considéré comme une propriété de cette interaction (Kelso, 1981a).

Dès lors, l'objectif n'est pas d'analyser chaque élément, chaque composant du système qui intervient dans la réalisation motrice, mais bien d'appréhender la complexité du mouvement humain par l'étude des phénomènes à un niveau macroscopique (de Gennes, 1987).

L'approche dynamique suppose que le contrôle moteur est autonome (c'est-à-dire indépendant du temps), évoluant en fonction des conditions initiales et de l'état actuel du système (Walter, Lee & Sternad, 1998). En conséquence, la dynamique inhérente au système est génératrice de l'action motrice. Ceci marque un déni du primat de la cognition dans le contrôle moteur : par exemple la modification qualitative du pattern de locomotion sous l'influence de l'augmentation de la vitesse (c'est-à-dire la transition de la marche à la course) n'est plus considérée comme le résultat de décisions délibérées, mais des interactions non linéaires de tous les composants du système (Brisswalter & Mottet, 1996; Collins & Stewart, 1993; Hoyt & Taylor, 1981).

Pourtant nul ne peut ignorer l'existence de modulations volontaires du comportement moteur sous l'influence des représentations ou encore d'instructions explicites reçues par les sujets. Il suffit par exemple d'indiquer à un sujet, marchant tranquillement, de " se dépêcher " pour qu'il adopte volontairement le pattern de course pour satisfaire cette exigence. Cet exemple de modification qualitative et délibérée du comportement révèle l'importance des intentions du sujet, susceptibles d'altérer le processus d'émergence des coordinations motrices. Les approches cognitivo-énergétiques du comportement ont également évoqué l'influence d'autres facteurs, tels que l'état émotionnel, motivationnel ou énergétique de l'individu (Gaillard, 1993; Humphreys & Revelle, 1984; Sanders, 1983).

Le but de ce travail est de montrer comment on peut intégrer dans les modèles dynamiques du comportement moteur ces divers facteurs motivationnels (les intentions, l'effort), mais également énergétiques (l'activation, la vigilance, la fatigue), et émotionnels (le stress, l'anxiété), et quel rôle ces derniers peuvent jouer dans le contrôle des coordinations motrices. Par analogie aux différents modèles cognitivo-énergétiques associant aux structures de traitement de l'information des réservoirs énergétiques modulant l'efficacité de la performance, nous envisageons que ces divers facteurs, considérés dans les théories dynamiques en tant que contraintes cognitives (Swinnen,

Heuer, Massion & Casaer, 1994), sont susceptibles de peser sur la dimension qualitative du comportement moteur.

Les contraintes, d'une manière générale, sont définies comme l'ensemble des facteurs qui limitent les degrés de liberté d'un système, c'est-à-dire ses possibilités d'action (Kugler, 1986, p. 470). Un tapis roulant lancé à 15 km.h⁻¹ constitue par exemple une contrainte essentielle, qui ne laisse à un individu guère d'autre choix que de courir. Newell (1986) a proposé une classification des contraintes : celles liées à la tâche, celles liées à l'individu et celles liées à l'environnement. Aucune de ces contraintes n'est en soi unique responsable de l'émergence du comportement moteur désiré : chacune est noyée dans un système complexe d'interactions.

Nos axes de travail s'inscrivent principalement sur le rôle de ces contraintes sur le contrôle des coordinations motrices complexes. Nous nous attacherons plus précisément :

(1) à confirmer les effets de contraintes qui permettent au sujet d'orienter spécifiquement ses objectifs comportementaux, par le biais de consignes intentionnelles ou de fixations de but (*goal-setting*), sur lesquels la littérature commence à être fournie (Scholz & Kelso, 1990; Carson, Goodman, Kelso & Elliott, 1994; Lee, Blandin & Proteau, 1996). Nous verrons comment ces instructions intentionnelles modifient qualitativement la dynamique du système considéré, et surtout en quoi elles induisent une meilleure mobilisation de *l'effort*, comme cela a été maintes fois suggéré dans la littérature sur le *goal-setting* (Locke & Latham, 1985; Locke, Shaw, Saari & Latham, 1981; Weinberg & Weigand, 1993).

(2) par le biais d'instructions expérimentales, à manipuler directement le degré d'effort investi par le sujet, c'est-à-dire la dimension intensive du comportement intentionnel (i.e. le concept de *on-task effort* d'Humphreys et Revelle, 1984, p. 158). Ce type de contrainte permettrait d'accroître le niveau de stabilité des coordinations.

(3) à montrer que certaines contraintes liées à l'environnement et au contexte affectent le comportement moteur en modifiant directement l'état énergétique et émotionnel de l'organisme (e.g., Hockey, 1984) et de ce fait les caractéristiques dynamiques du système. On fait l'hypothèse que la modulation des niveaux

d'activation, de stress ou d'anxiété du système entraînent des modifications qualitatives et/ou quantitatives des habiletés motrices complexes.

Approche synergétique des systèmes dynamiques

1- Introduction

Depuis quelques années, on voit apparaître dans des disciplines scientifiques fort différentes un intérêt grandissant pour des approches inspirées de la théorie des *systèmes dynamiques non linéaires*. Des analogies, dans les comportements qualitatifs ou dans les modifications de ces comportements sous l'effet de variations de certains paramètres, mises en évidence dans le passé en astronomie, mécanique, électronique, électrotechnique, hydraulique, ont été ainsi reconnues récemment dans des systèmes loin de l'équilibre thermodynamique en biologie, écologie, cinétique, chimie ou encore en physique.

Pourtant après la première guerre mondiale, la plupart des mathématiciens français ont délaissé la voie ouverte par Poincaré (1854-1912), (e.g., Chabert & Dahan Dalmedico, 1991; Gilain, 1991) en particulier lors de ses travaux sur le problème de la stabilité du système solaire (*Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, 1892-1899). En fait, ce sont essentiellement les “écoles” de mécanique non linéaire d'URSS (en particulier l'école moscovite de Mandelshtam) qui, dès les années 30, ont tiré le meilleur parti des travaux de base de Poincaré, en développant les méthodes d'études, tant analytiques que qualitatives, liées à ce qu'elles nommaient la “*théorie des oscillations non linéaires*” (Bergé, Pomeau & Dubois-Gange, 1997). Par exemple, Andronov démontre dans sa thèse de doctorat de 1929 sur “*les cycles limites de Poincaré et la théorie des oscillations auto-entretenues*” “l'applicabilité des travaux de Poincaré (analyse qualitative dans l'espace des phases), de Lyapunov (stabilité du mouvement) et de Birkhoff (dynamique topologique) à l'étude des oscillations non linéaires de la physique classique” (Diner, 1992, p. 340).

Sur le plan mathématique, la théorie des catastrophes (Thom, 1980), qui offre une analyse formelle de la complexité qualitative et des bifurcations dans les systèmes dynamiques, conditionnés par les propriétés de *fonctions de potentiel*, a donné une nouvelle et importante impulsion à ces questions. En outre, la prise de conscience de l'ensemble de cette situation scientifique a conduit certains physiciens à voir là une nouvelle approche, interdisciplinaire et pleine de promesses, baptisée “*synergétique*”

(théorie des systèmes ouverts), et destinée à révéler les traits communs des différents domaines de la Science (Haken, 1983; 1984).

Sous cet angle théorique de la formation spontanée et auto-organisée de la structure dans un système dissipatif (i.e. un système ouvert maintenu loin de l'équilibre thermodynamique), la considération récente de certains processus des sciences de la vie et des sciences physiques a eu une conséquence scientifique importante, qui ne s'était pas dégagée aussi nettement dans le passé, en dehors de la mécanique céleste : la mise en évidence de l'importance pratique de *comportements dynamiques complexes*. De tels comportements, appelés selon les auteurs et les disciplines, *désordonnés, chaotiques, stochastiques* (bien que le système considéré soit déterministe) ou *attracteurs étranges* (par exemple l'attracteur étrange du météorologue Lorentz, 1963), se définissent par l'absence d'états stationnaires parfaitement stables, de type position d'équilibre, ou de régime oscillatoire de période inférieure à la durée des observations.

Sous l'influence des conditions environnementales parfois " critiques " (Kelso & Schönner, 1988), ces comportements correspondent à des solutions bien définies d'équations " modèles " qui, pour certaines classes de problèmes, ont des formes simples. Cette simplicité se traduit par une équation différentielle ou une équation aux récurrences (exprimant que l'état futur d'un système isolé doit revenir arbitrairement près de son état initial, sauf pour un ensemble exceptionnel d'états initiaux de probabilité nulle) de faible dimension (ou ordre).

2- Système dynamique

Quelle que soit sa nature (physique, chimique, biologique, économique, etc...), on appelle *système dynamique* tout système évoluant au cours du temps (Bergé, Pomeau & Vidal, 1984, p. XI). Un tel système n'est généralement connu, au départ, que par des relations entre des grandeurs définies instantanément (forces, vitesses, accélérations, etc.), c'est-à-dire " un ensemble de variables numériques qui évoluent dans le temps en parallèle et interagissent à travers des équations différentielles " (Smolensky (1986), cité par Bonnet *et al.*, 1994). Ces dernières relient le taux de variation continue d'une certaine grandeur aux valeurs de toutes les grandeurs du système dynamique.

Tout système dynamique est associé à deux sortes de variables : les variables dynamiques et les variables statiques. Les premières sont les grandeurs fondamentales qui changent avec le temps. Par exemple, les variables dynamiques sont la position ou la vitesse de pièces en mouvement. Les variables statiques, également nommées paramètres du système, fixées une fois pour toutes, seraient la longueur de cette pièce ou bien par exemple le diamètre d'une roue (Ditto & Pecora, 1995, p. 68). Une des façons de visualiser la structure des équations différentielles est d'imaginer un espace multidimensionnel où un point parcourt une trajectoire continue. A n'importe quel instant t , ce point contient toutes les informations sur l'état du système considéré. Ses projections sur les divers axes donnent la valeur de tous les paramètres pertinents qui caractérisent l'état du système. Un tel espace, appelé *espace des phases*, est une représentation où chaque axe est associé à une variable dynamique pertinente du système.

Par exemple, dans le cas d'un pendule libre, l'espace des phases est à deux dimensions. Le point représentatif de ce système a pour coordonnées l'angle θ (angle que fait, à l'instant t , le pendule avec la verticale) et la vitesse angulaire de ce pendule, $d\theta/dt$. Quand le pendule oscille sans amortissement (on néglige toute force de frottement), le point représentatif décrit une orbite périodique : le système repasse périodiquement par les mêmes états, représentant ce qu'on appelle un *cycle limite*. Dans ce cas, l'oscillateur est linéaire et qualifié conservatif : il y a conservation de l'énergie totale du système. L'état de ce type de systèmes dynamiques conservatifs ne dépend que des conditions initiales au temps t_0 des variables dynamiques. Quand le pendule est amorti (exprimant une perte progressive d'énergie due aux frottements), la trajectoire du point représentatif dans l'espace des phases tend vers un point unique, à l'origine des deux axes : ce point, ou *attracteur ponctuel*, correspond à l'état final du pendule amorti. Quelles que soient les conditions initiales, l'effet de cet amortissement réduit exponentiellement l'amplitude des oscillations à zéro.

Mais les caractéristiques de ces différents oscillateurs linéaires, régis par des équations différentielles parfaitement connues (voir Bergé *et al.*, 1984), se sont modifiées à la suite d'observations prouvant que l'équation différentielle du pendule est non linéaire, celui-ci pouvant avoir des comportements chaotiques. L'état du pendule n'est plus uniquement proportionnels à l'angle θ ou à l'une de ces dérivés : la force qui

tend à ramener le pendule dans sa position d'équilibre varie comme le sinus de θ . Si on peut remplacer la fonction sinus par une simple loi linéaire pour des petits θ (la trajectoire du système se représente alors par un cycle limite), les effets non linéaires deviennent de plus en plus prédominants lorsque les angles θ deviennent importants (Bergé, Pomeau & Dubois-Gange, 1997, p. 262-264).

3- Importance qualitative de la non-linéarité

Si dans le passé, la plupart des comportements dynamiques non linéaires étaient considérés comme cas pathologiques, ils sont maintenant de plus en plus reconnus en tant que "qu'effets naturels" dont les éléments fondamentaux s'expriment par des propriétés mathématiques caractéristiques. Or, "la science d'aujourd'hui nous montre que la nature est impitoyablement non linéaire" (Stewart, 1998, p. 125). Sans faire ici l'historique de la non-linéarité dans la conception des théories scientifiques (Ekeland, 1995; Parrochia, 1997), son acceptation et son analyse permettent d'appréhender la dimension qualitative des comportements dynamiques complexes. En effet, il faut noter parmi les systèmes évolutifs ceux pour lesquels les non-linéarités entraînent de petits effets, et ceux pour lesquels leur influence est dominante. Dans ce dernier cas, il arrive que le comportement dynamique observé perde toute régularité. Le problème de la transition ordre \leftrightarrow désordre, sous l'effet de variations de paramètres ou d'une petite perturbation de structure, prend dans ce contexte une importance particulière.

Un caractère commun à tous les systèmes réels, rencontrés dans la nature ou créés par l'homme, est d'être soumis au vieillissement ou aux modifications de l'environnement, c'est-à-dire à une modification dans le temps des caractéristiques des éléments constitutifs. La traduction mathématique de ce phénomène est une variation des paramètres des équations décrivant le comportement du système considéré. Ces modifications peuvent aussi être dues au milieu extérieur. Ces variations, si elles sont suffisamment petites, n'affectent que quantitativement les solutions liées au comportement. Cependant dans certains cas elles sont suffisamment fortes pour

provoquer des modifications du comportement qualitatif. La nature des solutions change; on dit qu'une *bifurcation* ou une *transition de phase non équilibrée*¹ a eu lieu.

Ces transitions de phase, de nature fort diverses, sont la conséquence, dans le sens ordre → désordre, de l'accroissement des effets non linéaires. Une autre cause de désordre concerne le cas où un mouvement collectif macroscopique constitue une manifestation "statistique" d'un grand nombre de mouvements microscopiques, décrits par la même équation, mais correspondant à des conditions initiales différentes. Au plan pratique, il convient de déterminer les domaines de ces conditions initiales, tel que chacun correspond au même comportement qualitatif ou au même mode de fonctionnement. Chacune de ces régions est le *domaine d'attraction* (appelé encore *domaine de stabilité*) du ou des états stationnaires stables (appelés aussi *attracteurs*).

4- La formation spontanée d'états ordonnés

Bien que hors de l'équilibre thermodynamique, les systèmes ouverts se caractérisent par l'émergence d'un ordre spatial et/ou temporel. Un des exemples le plus connu concerne le phénomène de convection mis en évidence expérimentalement par Henri Bénard au début du siècle (Flesselles, Croquette, & Janiaud, 1995; Velarde & Normand, 1987). En chauffant de l'huile de silicone dans un récipient, Bénard a découvert qu'une forme hexagonale et régulière se dégageait à la surface du liquide lorsque la température devient assez élevée. De même, dans des conditions légèrement différentes, les mouvements de convection dans le liquide peuvent former des rouleaux qui tournent autour d'axes horizontaux, présentant là aussi une structure régulière. Ainsi des états très réguliers peuvent se former, engendrés par une véritable *auto-organisation*.

Ce processus d'auto-organisation signifie que l'ordre spatio-temporel des états se forme sans aucune implication d'une unité externe de contrôle (Kelso, Ding & Schöner, 1993) et exprime l'interaction complexe et cohérente des sous-systèmes (i.e. l'ensemble des éléments microscopiques du système). Il en résulte un comportement dynamique macroscopique, modélisable au travers de *variables collectives*, les

¹ La bifurcation est le terme généralement employé par les mathématiciens, alors qu'une transition de phase non-équilibrée est préférentiellement utilisée par les physiciens. Dans ce travail, cette idée de modification qualitative s'exprimera davantage au travers de la transition de phase.

paramètres d'ordre. Ainsi comme le montre la synergetique (Haken, 1983), les paramètres d'ordre dépendent de la coopération entre les éléments microscopiques, qui est gouvernée en retour par le comportement macroscopique (défini par la dynamique des paramètres d'ordre). Cette causalité circulaire entre ces deux niveaux d'analyse, microscopique et macroscopique, exprime *le principe d'esclavage* (slaving principle) : tout élément microscopique devient esclave de l'ordre macroscopique qu'il fait émerger.

5- Degrés de liberté et complexité

La formation des états spatiaux et temporels peut émerger spontanément lorsque les conditions environnementales évoluent et atteignent une valeur critique (Kelso & Schöner, 1988). Sous l'influence de ces conditions, conceptualisées en tant que *paramètres de contrôle* (par exemple, l'évolution de la température du liquide dans l'étude des mouvements convectifs de Bénard), le système génère une structure macroscopique de faible dimension, exprimant une réduction *des degrés de liberté* de ce système. Cette "compression" (e.g., Haken, 1983), représentée par la dynamique du paramètre d'ordre, rend compte d'une réduction importante de la *complexité* du système.

Définie en termes de degrés de liberté, c'est-à-dire le nombre d'éléments hétérogènes ou de variables susceptibles de varier indépendamment des uns des autres, cette complexité constitue une des conditions fondamentales pour l'émergence des états ordonnés ou attracteurs (Haken & Wunderlin, 1990; Bonnet *et al.*, 1994). L'existence de ces derniers permet d'affirmer que la coopération au sein du monde microscopique de forte dimensionnalité (liée au nombre de degrés de liberté) a évolué vers une unité macroscopique complexe dont la description ne dépend plus que d'un petit nombre de paramètres d'ordre (Kay, Kelso, Saltzman & Schöner, 1987; Prigogine & Stengers, 1992, p. 71).

6- Les équations d'état

La formulation et la modélisation mathématique des états spontanément ordonnés, caractérisés par les variables collectives de faible dimension se traduisent par l'équation d'état suivante (Kelso *et al.*, 1993) :

$$\dot{q} = N(q, \text{bruit}) \quad (1)$$

où \dot{q} correspond à la dérivée première du vecteur q , ce dernier capturant l'état du système. La fonction N , en général non linéaire, est définie par la structure des états du système (Schöner & Kelso, 1988a). En outre, la dynamique spontanée des états du système (\dot{q}) dépend également du bruit, c'est-à-dire des forces aléatoires sous-jacentes à la dynamique de tous les sous-systèmes. Issue de toutes les interactions microscopiques entre les éléments du système, cette propriété stochastique joue un rôle fondamental sur la stabilité du système et les modifications qualitatives (i.e. transitions de phase) dans l'espace des phases (Haken, 1983).

Comme nous l'avons déjà souligné, de par la nature même d'un système dynamique (i.e le niveau d'analyse est représenté par des "étapes" temporelles qui tendent vers zéro), l'émergence des états ordonnés est caractérisée par une équation différentielle² :

$$F(q) = \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

où q représente l'état du système et t la variable temps. La partie droite exprime un taux instantané de variation de l'état q par rapport au temps. Ainsi la description mathématique d'un système dynamique par les dérivés premières de quantités caractéristiques des différents états du système prend une réelle signification. L'évolution des états permet d'appréhender les propriétés non linéaires du système : les perturbations quantitatives de la stabilité du système et principalement *la perte de*

² Pour comprendre l'intérêt et la signification de ces équations, le lecteur peut se référer à l'exemple simple de l'évolution de populations animales dans un espace géographique de P. Chossat (*Les symétries brisées*, 1996, Paris : Pour la science; appendice B, p. 101-109).

stabilité (Kelso & Schönner, 1988), indice précurseur des modifications qualitatives du comportement.

7- Portrait de phase

Pour visualiser l'évolution de tous les états possibles d'un système dynamique, un *portrait de phase* permet la représentation des trajectoires, des solutions de l'équation différentielle. Les lignes courbes résultantes indiquent l'écoulement (*flow*) dans le temps de toutes les coordonnées de l'espace des phases. Ceci caractérise le champ vectoriel (*vector field*), c'est-à-dire F de l'équation 2. Quantitativement, F peut être décomposé en différents ensembles appelés bassins. Chacun de ces ensembles caractérise un état particulier du système dynamique : un *attracteur*, un *repellant* ou un *point-col* (saddlepoint) (Kugler, 1986). Ces différents points d'équilibre se différencient par leur niveau de stabilité.

7-1 Attracteurs

Un attracteur, défini "comme étant... n'importe quoi du moment que tout y converge et s'y dépose. L'essence d'un attracteur est d'être une portion de l'espace des phases telle que n'importe quel point qui démarre aux alentours s'en rapproche de plus en plus" (Stewart, 1998, p. 163). Dans un plan (x, y, z) , l'état d'équilibre du système considéré correspond à une résultante nulle des forces horizontales du plan (x, y) . Ainsi un point d'équilibre *stable* du système définit un attracteur, dont la propriété est caractérisée par le retour vers zéro de la résultante des forces après de petites perturbations du système. Pour clarifier les choses, la métaphore d'une bille évoluant dans un paysage de collines et de vallées est généralement utilisée. La trajectoire asymptotiquement stable est symbolisée par l'évolution de la bille (i.e. l'état du système) au sein d'une vallée, appelée *domaine d'attraction* ou *puits de potentiel*. Un faible tremblement de terre (forme de perturbations) entraînerait des déplacements incessants de la bille sans que celle-ci ne cesse d'être "attirée" par la vallée. La figure 1A représente un attracteur dans le plan (x, y) , où le flux des différents états initiaux du système est indiqué par le sens des flèches.

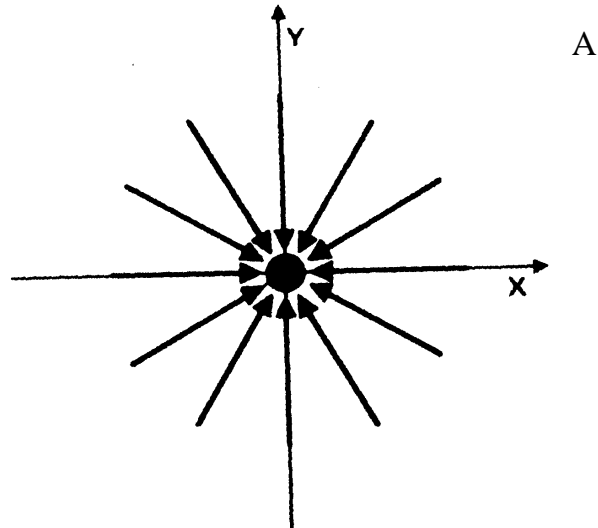


Figure 1A : Représentation dans le plan (x, y) d'un attracteur.

7-2 Repellants

Les solutions repellantes d'un système sont aussi des états d'équilibre, mais *instable*. Au niveau de cet état particulier, l'absence de force résultante exprime la tendance du système à quitter cet état. Le flux des points initiaux s'en éloignent (figure 1B). Cela correspond à la bille placée au sommet d'une colline. Le moindre coup de vent amplifie la caractéristique instable de cet état repellant : la bille tombe.

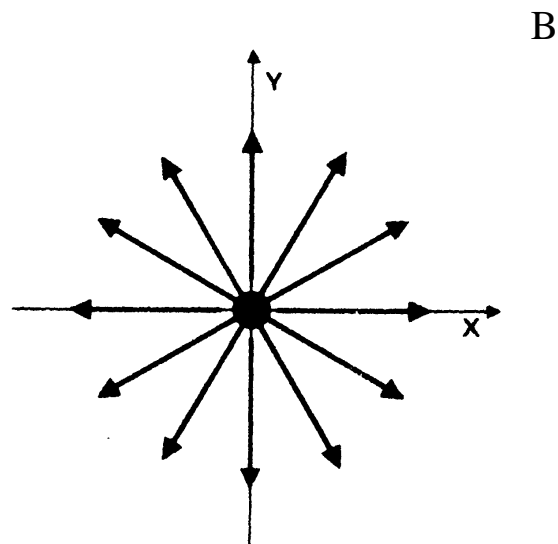


Figure 1B : Représentation dans le plan (x, y) d'un repellant.

7-3 Points-col

Ce type de point d'équilibre est une combinaison d'un attracteur et d'un repellant (figure 1C). L'état d'équilibre du système est stable (attracteur) dans certaines directions (plan x) et instables (repellant) dans d'autres (plan y). Si on imagine qu'un petit tremblement de terre se manifeste uniquement dans le plan des x, la bille se déplace au sein de ce bassin d'attraction, alors qu'un tremblement de terre "classique" (i.e. des perturbations agissant dans tous les plans) provoque la chute de la bille dans le plan des y. La définition de ce type d'états d'équilibre est fondamentale dans la compréhension de l'émergence d'un comportement macroscopique hautement ordonné, issu des couplages microscopiques des différents éléments constitutifs du système. Le développement des arches ou de dôme d'une termitière constitue l'exemple le plus probant de la fonction de ce type d'état d'équilibre dans le processus d'auto-organisation d'un système (Kugler, 1986, p. 501-505; Kugler & Turvey, 1987).

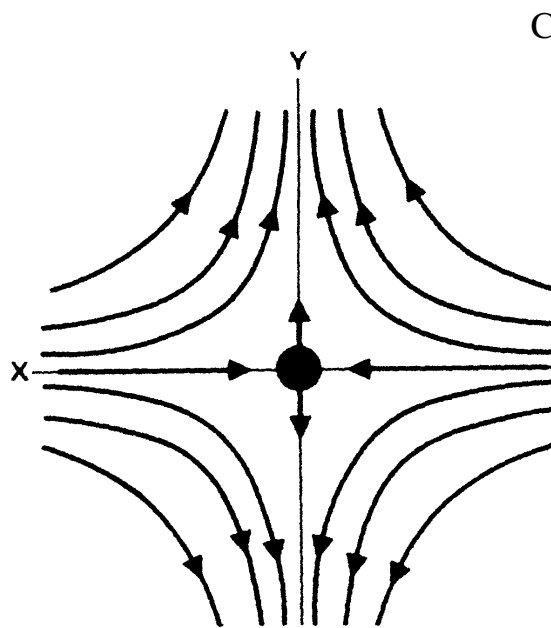


Figure 1C : Représentation dans le plan (x, y) d'un point-col.

8- Les propriétés stochastiques d'un système dynamique

Bien que du processus d'auto-organisation, propriété fondamentale des systèmes dynamiques non linéaires, émergent différents types d'états d'équilibre, force est de

constater que chacun de ces états tend vers une stabilité absolue sans jamais réellement l'atteindre. En d'autres termes, la dynamique des paramètres d'ordre capturant les différents comportements d'un système complexe se doit de rendre compte de ces fluctuations de la stabilité, inhérentes à la dynamique microscopique " asservie " ³ au système.

Ces fluctuations, ou *forces stochastiques* (aléatoires), permettent de traduire conceptuellement les modifications de la nature et/ou du nombre des états d'équilibre du système. En effet, d'un point de vue théorique, la présence de ces influences aléatoires (conceptualisées sous le nom générique de *bruit*) explique pourquoi une faible perturbation des conditions initiales du système soit suffisante pour observer une modification du portrait de phase. Ainsi, quelles que soient les caractéristiques de stabilité des états du système étudié, cette modification représente soit (1) le passage d'un état vers un autre, soit (2) la découverte de nouveaux états, soit (3) une modulation du niveau de stabilité des états (Schöner, Zanone & Kelso, 1992).

Puisque ces fluctuations au sein des équations d'état justifient le phénomène de transition de phase entre différents états, ces derniers sont donc extrêmement sensibles à la forme des équations d'état. En conséquences, une petite variation de ces équations peut provoquer une importante modification du comportement du système (Parisi, 1999). De ce fait, la mesure du niveau de stabilité ou plus exactement d'*instabilité* des paramètres d'ordre constitue le reflet du niveau de fluctuations subies par les états du système (e.g., Kelso & Schöner, 1988; Scholz, Kelso & Schöner, 1987; Schöner, Haken & Kelso, 1986).

9- Conclusion

Issue de l'approche synergétique (Haken, 1983; 1984), la description des concepts et des modélisations mathématiques (bien que très globale et non exhaustive) de la formation spontanée d'états structurés d'un système dynamique complexe et des modifications qualitatives associées, avait pour but de poser le cadre théorique dans lequel s'inscrit notre travail sur les coordinations motrices. En effet, comme le soulignent Kelso *et al.* (1993), " les mêmes principes peuvent être appliqués à tout système complexe sans tenir compte de leurs substrats matériels ".

³ cf. le principe d'esclavage, point 4.

Fort du constat de l'extrême complexité du système d'effection musculo-squelettique et des fortes non-linéarités qui caractérisent les différents couplages multi-segmentaires (Bernstein, 1967), toute coordination motrice est alors envisagée comme la résultante de processus d'auto-organisation (Kelso, 1981b). L'émergence d'un ordre spatio-temporel macroscopique, régie par les paramètres d'ordre, dépend de l'évolution cohérente des sous-systèmes, c'est-à-dire des éléments microscopiques qui composent le système d'action dans son ensemble. De nombreuses études ont effectivement démontré qu'une coordination rythmique inter-segmentaire est caractérisée par l'interaction des segments impliqués dans la tâche (Baldissera, Calvallari & Civaschi, 1982; Kelso, Holt, Rubin, & Kugler, 1981; Von Holst, 1973).

Suivant une grande variété de conditions expérimentales, l'étude des actions coordonnées selon le langage théorique de la synergétique (Kugler, Kelso & Turvey, 1980) a ainsi permis la mise en évidence (1) de patterns comportementaux qualitativement distincts (Delignières, Nourrit, Sioud, Leroyer, Zattara & Micallef, 1998; Kelso, 1984; Tuller & Kelso, 1989), (2) de niveau de stabilité des états attractifs quantitativement différents (Deschamps, Lauriot, Nourrit, Caillou & Delignières, sous presse; Kelso & Scholz, 1985), et (3) de transitions de phase entre différents patterns du système (Haken, Bunz & Kelso, 1985; Kelso & DeGuzeman, 1988; Peper, Beek & Van Wieringen, 1995; Serrien & Swinnen, 1999).

Sur la base de la connaissance de ces caractéristiques dynamiques des coordinations étudiées, le problème du contrôle des actions motrices peut ainsi être appréhendé au travers des interactions entre les multiples contraintes qui pèsent sur le processus d'auto-organisation du système. Dans ce cadre, l'étude des adaptations qualitatives et/ou quantitatives du comportement moteur humain peut être approchée à partir de la manipulation de contraintes liées à l'organisme, à l'environnement ou à la tâche (Newell, 1986).

Approche dynamique des coordinations motrices

1- Introduction

Jusqu'à un passé récent, l'ensemble des comportements mis en œuvre dans l'acquisition ou le contrôle d'habiletés motrices était envisagé comme résultant d'un contrôle cognitif hiérarchiquement supérieur responsable des niveaux d'exécution. Ainsi, les modèles du traitement de l'information (Sanders, 1990; Welford, 1967), prônant des relations linéaires entre les différentes étapes de traitement (Sternberg, 1969), et les modèles du contrôle moteur (Schmidt, 1988) étaient susceptibles d'expliquer l'ensemble des interactions d'un sujet exécutant avec son environnement et les modifications de ses comportements au cours de son évolution.

Or plusieurs critiques ont été émises à ce niveau. Retenons tout d'abord celle émise par Turvey et Kugler (1984) qui se demandent comment des représentations symboliques, sur lesquelles des calculs seraient effectués pour prescrire le comportement moteur, pourraient indiquer aux systèmes moteurs le nombre infini de configurations qui peuvent exister dans leur fonctionnement dynamique. D'une manière plus générale, la métaphore du programme moteur (Schmidt, 1975) pose le problème de la régression à l'infini (Bonnet *et al.*, 1994, p. 636-639). Quand les différents segments de notre corps sont en mouvement, une coopération continue et coordonnée peut être décrite. Si les théories prescriptives du comportement moteur répondent que cet ordre et cette coordination entre les éléments du corps sont inscrits dans le programme moteur, on doit alors s'interroger sur l'origine de l'information contenue au sein même de ce programme. Comme le soulignent Kugler et Turvey (1987), ces interrogations peuvent se répéter indéfiniment.

En réponse à ces limites des modèles cognitifs, on peut tout d'abord retenir le modèle écologique (Gibson, 1979) qui postule que l'information n'est pas calculée, mais directement prélevée du couplage perception-action. Ce modèle permet d'expliquer certaines interactions sensori-motrices complexes telles qu'attraper un projectile (Bootsma, Fayt, Zaal & Laurent, 1997) ou se déplacer vers une cible (Laurent, 1991; Montagne, Cornus, Glize, Quaine & Laurent, 2000), en mettant en évidence des caractéristiques invariantes de l'interaction perception-action. Aucun

contrôle intentionnel du sujet n'est suggéré dans la mise en place des mécanismes effecteurs.

Elaboré à la suite de Bernstein (1967) en réponse aux problèmes posés par le contrôle d'un nombre important de degrés de liberté et du stockage en mémoire d'une structure hiérarchisée (i.e. le programme moteur généralisé, Schmidt, 1988), le modèle dynamique des coordinations motrices postule que la mise en forme d'un mouvement humain est totalement étrangère à une instance centrale de programmation. En effet, les récentes études " dynamiques " ont mis l'accent sur la nature auto-organisée, autonome du système humain composé de multiples degrés de liberté, représentés par tous les composants neuraux, musculaires, articulaires et métaboliques (Bingham, Schmidt, Turvey & Rosenblum, 1991; Kelso, Schöner, Scholz & Haken, 1987).

La dynamique des synergies motrices complexes (i.e. un ensemble de composants neuro-musculaires assemblés temporairement en une unité spécifique à la tâche, Kelso, Holt, Kugler & Turvey, 1980; Kugler *et al.*, 1980) révèle, selon les conditions environnementales, des changements qualitatifs du comportement. L'observation de telles transitions de phase n'est pas sans conséquence théorique dans la compréhension des systèmes complexes de coordinations. Elle permet non seulement une nette distinction entre les patterns comportementaux, mais également l'identification de la dimension macroscopique du système, le paramètre d'ordre. La dynamique de ce dernier permet de capturer les différents états coordonnés du système, leur niveau de stabilité, et la perte de stabilité d'un état conduisant à un changement de comportement. L'étude des transitions de phase permet également d'identifier les paramètres de contrôle, variables qui, pour certaines valeurs dites critiques, provoquent l'adoption de nouveaux patterns comportementaux (Schöner & Kelso, 1988b).

2- Le système de contraintes

Les théories dynamiques du comportement moteur d'un système complexe postulent que les patterns " optimaux " de coordination et leur contrôle résultent de l'interaction des contraintes qui pèsent sur le système. D'une manière générale, ces contraintes sont définies comme l'ensemble des facteurs qui limitent les degrés de liberté du système, c'est-à-dire ses possibilités d'action. Dans ce cadre, Newell (1986) a proposé une classification des contraintes, en trois catégories : celles liées à

l'organisme, celles liées à la tâche et celles liées à l'environnement. Mais cette distinction ne doit pas laisser entendre qu'une contrainte est *en soi* responsable de l'émergence du comportement. C'est toujours l'interaction entre ces multiples contraintes qui suscite l'apparition de tel ou tel pattern comportemental, quand bien même on peut définir un rôle prédominant de telle ou telle contrainte sur la dynamique résultante (e.g., Delignières, Nourrit, Deschamps, Lauriot & Caillou, 1999; Kelso & Jeka, 1992; Scholz & Kelso, 1990; Temprado, Zanone, Monno & Laurent, 1999).

Les contraintes liées à l'organisme comprennent d'une part les contraintes structurelles relativement indépendantes du temps telles le poids ou la taille, et d'autre part les contraintes fonctionnelles telles que la connexion neurale; celles-ci étant grandement dépendantes du temps. Pour la catégorie liée à la tâche, Newell (1986) a proposé trois sous divisions de contraintes : (i) celles relatives au but de la tâche, (ii) celles liées aux consignes explicites spécifiant la dynamique comportementale exigée, et (iii) celles concernant les structures physiques externes, à savoir les outils et les dispositifs expérimentaux utilisés. Pour finir, les contraintes liées à l'environnement regroupent toutes les contraintes externes à l'organisme et à la tâche, tel que le climat.

Très schématiquement, Bingham (1988) a réorganisé ces différentes contraintes selon deux catégories : les contraintes inhérentes au système neuro-musculo-squelettique (soit les contraintes de l'organisme de Newell) et les contraintes incidentes, auxquelles sont associées les caractéristiques spécifiques de la tâche ou du contexte environnemental (soit les contraintes de l'environnement). En revanche, Bingham (1988) émet une différence entre contraintes liées au but ou aux consignes spécifiques de la tâche et celles liées aux structures physiques externes. En effet, il conçoit les premières en tant que contraintes incidentes lorsque le but ou les consignes sont explicitement spécifiés, alors que, dans le cas contraire, le sujet pourrait très bien intérioriser ou s'auto-assigner un objectif à atteindre, ce qui rend compte de contraintes dynamiques inhérentes.

Au-delà de ces petites différences, tant au niveau du vocabulaire que des classifications, ce qu'il faut retenir des propositions de Newell (1986) ou de Bingham (1988) est que le système de contraintes n'exclue pas l'influence des dimensions cognitives sur l'émergence du comportement moteur. Par exemple, l'idée d'une

assignation d'un but à atteindre, que ce soit de façon implicite ou explicite, n'autorise pas la négation de l'existence des intentions ou des représentations et de leur influence sur la réduction de la dimensionnalité du système. Il se dégage alors un point théorique fondamental dans l'évolution du positionnement des cognitions au sein des modèles de la motricité. Situées au plus haut niveau dans les modèles cognitifs, avec une fonction de pilotage prescriptif de la motricité, ces *contraintes cognitives* (Swinnen *et al.*, 1994) deviennent dans les modèles dynamiques un élément constitutif de l'ensemble des contraintes, noyées dans un système complexe d'interactions.

Un des premiers objectifs de notre travail sera de valider ce point théorique, en s'appuyant tout particulièrement sur la dynamique des patterns de coordination de la tâche bimanuelle d'oscillations rythmiques, particulièrement utilisée comme support expérimental par les dynamiciens.

3- Paradigme de la tâche bimanuelle d'oscillations rythmiques

Afin d'analyser le problème de la régulation des degrés de liberté internes à un système moteur (Bernstein, 1967) dans le cadre théorique de la physique de l'auto-organisation et de la formation de la structure dans les systèmes ouverts (Haken, 1983; 1984), le paradigme le plus classiquement utilisé est la réalisation d'une tâche bimanuelle d'oscillations rythmiques. Sous le couvert qu'une coordination représente une conséquence émergente d'interactions dynamiques d'oscillateurs (i.e. les membres effecteurs impliqués) non linéaires type cycle limite (Kay *et al.*, 1987; Kelso, 1977; Kelso *et al.*, 1980; Kelso *et al.*, 1981), ce paradigme consiste à demander au sujet de déplacer deux membres (bien souvent les index ou les mains) dans certaines directions, et ceci de manière répétitive et synchronisée.

3-1 Scott Kelso, le précurseur

3-1-1 Les patterns comportementaux préférentiels

L'utilisation de ce paradigme, au travers d'un dispositif expérimental originellement mis en place par Kelso (1981b; 1984), a mis en évidence deux patterns comportementaux spontanément adoptés par le système. Que ce soit pour des mouvements oscillatoires des index (1981a) ou des poignets (1984), il a effectivement observé que, pour de faibles fréquences d'oscillation (dictées par un signal visuel ou

auditif et exprimées en Hertz) -correspondant à un paramètre de contrôle du système- seuls deux patterns comportementaux étaient régulièrement réalisés avec une grande stabilité : le *pattern en phase* et le *pattern en anti-phase*. Par définition, le premier se caractérise par une contraction simultanée des groupes musculaires homologues impliqués, alors que le pattern en anti-phase correspond à une contraction simultanée des groupes musculaires non homologues⁴.

Ces patterns préférentiels se caractérisent par une synchronisation absolue des phases et des fréquences. Pour bien comprendre ces relations, il faut rappeler que dans un mouvement rythmique, la *phase* fait référence au pourcentage du cycle parcouru à un instant donné t . Mathématiquement, cette mesure (notée θ) représente la coordonnée angulaire du mouvement, exprimée en degrés ou radians, c'est-à-dire l'arctangente de la vitesse angulaire par rapport au déplacement angulaire. Ainsi la différence entre les phases de chaque oscillateur (l'index ou le poignet) exprimant une *phase relative* ou *décalage de phase*⁵, noté ϕ , a été reconnue comme paramètre d'ordre pertinent pour caractériser les coordinations préférentielles du système. Quand $\phi = 0^\circ$, les deux oscillateurs sont synchronisés sur le pattern en phase. Le pattern de coordination en anti-phase se traduit par une phase relative $\phi = 180^\circ$ ou $\phi = -180^\circ$; ces deux solutions possibles rendant compte du caractère périodique et symétrique d'un mouvement dynamique oscillatoire. Une synchronisation absolue des fréquences signifie que les fréquences adoptées par chaque oscillateur sont identiques, exprimant donc un rapport de fréquences type 1:1. Comme de nombreuses études l'ont démontré, ce rapport de fréquences, autre paramètre d'ordre possible du système, n'est pas sans conséquence sur

⁴ Il faut remarquer que ces définitions ne sont posées que par convention théorique. En effet, il a démontré qu'ils peuvent se caractériser en fonction de la direction de mouvement des oscillateurs impliqués dans la tâche. Cette possibilité a permis, entre autres, d'étudier l'influence de l'orientation spatiale sur le phénomène de transition de phase (Baldissera *et al.*, 1982; Baldissera, Cavallari, Marini & Tassone, 1991; Kelso, Buchanan & Wallace, 1991; Kelso & Jeka, 1992).

⁵ Je tiens à attirer l'attention des lecteurs sur la possible confusion sur le double sens du terme " phase " : (1) Elle exprime une mesure mathématique correspondant à une relation angulaire. (2) Elle représente également un état où il y a eu " regroupement de matière ". Ainsi en physique, la transition de phase exprime le passage d'un état à un autre (liquide \rightarrow solide). C'est sur la base de cette définition que la théorie synergétique a caractérisé le phénomène de transition de phase entre différents états comportementaux.

l'analyse de sa dynamique (Serrien & Swinnen, 1999; Sternad, Turvey & Saltzman, 1999a, 1999b, 1999c).

3-1-2 Confirmations expérimentales

De nombreuses études ont confirmé que seules deux relations stables de phase étaient préférentiellement adoptées par une personne réalisant une tâche d'oscillations rythmiques, à savoir $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$ (Scholz *et al.*, 1987; Schöner & Kelso, 1988b; Tuller & Kelso, 1989; Yamanishi, Kawato & Suzuki, 1979, 1980).

Par exemple, Tuller et Kelso (1989) ont utilisé deux métronomes visuels pour spécifier aux participants différents décalages de phase à réaliser sur un cycle de mouvement des deux index d'une seconde (i.e. une fréquence de 1 Hz), chaque cycle d'un index devant correspondre à une des deux lumières (cf. appareillage, p. 309). Les différents retards temporels entre l'apparition (20ms) des deux lumières, suivant 10 paliers de 100ms, décrivaient les différentes conditions expérimentales auxquelles étaient soumis les sujets : 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0. La synchronisation des deux lumières (0.0 ou 1.0) correspondait à la réalisation du pattern en phase, alors que le décalage de 500ms (0.5) caractérisait le mode de coordination en anti-phase. Leurs résultats montrent que les sujets réussissaient seulement à osciller régulièrement pour des décalages lumineux de 0.0, 0.5 et 1.0 (à savoir les patterns en phase et en anti-phase). Pour les autres conditions, la moyenne des phases relatives observées avait tendance à s'écarter de la phase relative requise, et dérivait vers le plus proche des deux patterns stables de ce système. Qui plus est, le niveau de variabilité (évalué par l'écart-type du décalage de phase) des patterns en phase et en anti-phase était significativement plus faible que le niveau des autres décalages. Ce pattern de résultat montrait ce que Schöner et Kelso (1988b) ont appelé *l'effet mouette* (seagull effect)⁶.

Suivant la logique synergétique, ce qu'il faut retenir de ces diverses applications expérimentales sur la dynamique des coordinations bimanuelles est l'identification de la

⁶ On peut également noter que Tuller et Kelso (1989) n'observèrent que de très "faibles" différences entre les types de populations étudiées : musiciens, non musiciens et des sujets présentant des lésions cérébrales (split-brain subjects). Les patterns en phase et en anti-phase étaient bien les modes de coordination les plus stables du système pour tous les sujets.

phase relative, ϕ , en tant que paramètre d'ordre du système. En effet, elle permet (1) de capturer les différentes relations stables et reproductibles entre tous les degrés de liberté du système, (2) de distinguer les différents états stables ou *attracteurs* de la tâche bimanuelle, à savoir le pattern en phase et le pattern en anti-phase, et (3) de quantifier leur niveau de stabilité ($SD\phi$).

Sur ce dernier point, il faut noter que les résultats diffèrent quelque peu. En effet, Kelso (1984) montre une différence de stabilité entre le pattern en phase et le pattern en anti-phase, résultat que Tuller et Kelso (1989) n'ont pas observé (p. 311). De la même façon, dans un protocole quelque peu similaire, ces derniers ne retrouvent pas les mêmes niveaux de variabilité des deux attracteurs que ceux observés par Yamanishi *et al.* (1980). Ces observations mettent en évidence l'influence de certaines exigences expérimentales, liées dans les cas présents à la perception (Tuller & Kelso, 1989) ou à la mémoire (Yamanishi *et al.*, 1980), sur la dynamique des coordinations motrices. Ces exemples de contraintes spécifiques, conceptualisées en tant qu'*information comportementale* (Schöner & Kelso, 1988a, 1988c), constituent un point essentiel à notre travail et seront largement abordés ultérieurement.

3-1-3 La transition de phase

Sur la base de la connaissance de la dynamique intrinsèque de la tâche bimanuelle, caractérisée par le pattern en phase et le pattern en anti-phase, un phénomène intéressant a été mis en évidence par Kelso (1981b). Alors qu'il était demandé aux sujets, couplant initialement leurs index selon le mode de coordination en anti-phase, d'augmenter progressivement leur fréquence d'oscillation, un passage brusque et involontaire sur le pattern en phase a été observé à une fréquence dite critique. De même, en proposant des fréquences d'oscillation supérieures et relatives à leur fréquence critique, les sujets ne pouvaient satisfaire ces exigences de fréquence qu'en adoptant le pattern en phase (Kelso, 1984).

De telles transitions de phase (le passage d'un état stable vers un autre état stable lorsqu'un paramètre de contrôle du système atteint une valeur critique), ont été maintes fois reproduites, et ceci dans divers systèmes d'oscillateurs impliquant :

- (1) les index (Kelso, Buchanan, DeGuzman & Ding, 1993; Kelso, Scholz & Schöner, 1988; Scholz et Kelso, 1989, 1990),
- (2) les poignets (Byblow, Carson & Goodman, 1994; Kelso, Scholz & Schöner, 1986),
- (3) les épaules (Swinnen, Walter, Serrien & Vandendriessche, 1992),
- (4) le poignet et le coude d'un même bras (Buchanan & Kelso, 1993; Kelso *et al.*, 1991),
- (5) un seul membre effecteur et des stimuli périodiques visuels (Byblow, Chua & Goodman, 1995) ou auditifs (Kelso, DelColle & Schöner, 1990),
- (6) les membres supérieurs et inférieurs (Baldissera *et al.*, 1991; Jeka & Kelso, 1995; Kelso & Jeka, 1992),
- (7) les jambes de deux personnes différentes (Schmidt, Carello & Turvey, 1990).

Toutes ces transitions de phase sont de même nature que les transitions d'allure rencontrées dans l'étude de la locomotion (Durand, Goudal, Mercier, Le Gallais & Micallef, 1994; Holt, Hamill & Andres, 1991; Schöner, Jiang & Kelso, 1990). Par exemple, Beuter et Lefebvre (1988) démontrent qu'en plus de l'augmentation progressive de la vitesse, une charge corporelle supplémentaire constituait un autre paramètre de contrôle, déterminant une transition marche-course plus précoce. Mais deux propriétés caractéristiques de l'étude dynamique de la transition doivent être relevées. Tout d'abord, un phénomène d'*hystérésis* est observé, indiquant des vitesses de transition marche-course versus transition course-marche significativement différentes, les vitesses relevées dans le premier cas étant plus importantes (Beuter et Lefebvre, 1988). Ce résultat démontre le caractère non linéaire du système locomoteur complexe. En second lieu, l'augmentation significative de la variabilité de la durée de la foulée à l'approche de la transition de phase (Brisswalter & Mottet, 1996) est parfaitement en accord avec les prédictions synergétiques de l'augmentation des fluctuations dans le système, annonciatrices des modifications qualitatives du comportement.

3-2 Stabilité, perte de stabilité, et fluctuations des coordinations bimanuelles

Ces fluctuations, propriétés stochastiques inhérentes à tout système dynamique (Haken, 1983), ont également été observées dans les études utilisant le paradigme de la tâche bimanuelle (Kelso & Scholz, 1985; Kelso *et al.*, 1986; Scholz & Kelso, 1989), attestant ainsi du caractère non équilibré de la transition de phase du pattern en anti-phase vers le pattern en phase.

3-2-1 Fluctuations critiques (*critical fluctuations*)

Une des mesures quantitatives possibles de ces fluctuations est la variabilité de la dynamique du paramètre d'ordre, la phase relative ϕ . Cet écart-type de ϕ représente la métrique de la stabilité des états d'équilibre du système. Ainsi lorsqu'on augmente toutes les 4 secondes la fréquence d'oscillation de 0.25Hz, la dynamique de la moyenne de la phase relative et sa variabilité⁷ pour les deux attracteurs peut être appréhendée. Les résultats montrent que ces deux variables dépendantes restent relativement constantes pour le pattern en phase, quelle que la fréquence d'oscillation. En revanche, une forte augmentation des fluctuations a été observée pour le pattern en anti-phase à l'approche de la transition de phase (Kelso & Scholz, 1985; Kelso *et al.*, 1986).

Ces fluctuations critiques marquent la perte de stabilité du pattern en anti-phase, annonciatrice de la transition de phase. Au-delà de cette dernière, seul le pattern en phase reste présent dans la dynamique du système. Qui plus est, comme le montrent Kelso et Scholz (1985), lorsque les sujets commencent leurs mouvements d'oscillations sur le mode en phase à des fréquences supérieures à leur fréquence critique, une diminution progressive de cette fréquence n'induit pas de passage sur le pattern en anti-phase. Ce résultat indique que le pattern de coordination en phase est l'attracteur intrinsèquement le plus stable du système. Cette propriété contraint fortement la dynamique résultant du système.

3-2-2 Ralentissement critique (*critical slowing down*)

⁷ Deux calculs de la dynamique de la phase relative sont possibles, soit une estimation discrète (point estimate) ou une estimation continue. L'estimation discrète consiste à ne calculer la différence de phase des deux oscillateurs qu'au niveau d'un point de rebroussement précis, c'est-à-dire au point où le mouvement de l'oscillateur, choisi comme référent, change de direction. L'estimation continue consiste à calculer la phase relative à chaque instant, à chaque donnée de position. Mais ces deux types de mesure rapportent des patterns de résultats quasi-identiques (cf. Zanone et Kelso, 1997, appendice p. 1478-1480).

Cette seconde mesure des fluctuations du système de coordinations bimanuelles exprime une augmentation exponentielle du *temps de relaxation* du pattern en anti-phase à l'approche des valeurs critiques du paramètre de contrôle (Scholz *et al.*, 1987; Scholz & Kelso, 1989). Ce concept de temps de relaxation, τ_{rel} , mesure également la stabilité des attracteurs. Il s'exprime au travers du temps que met le système pour retourner sur un état stable à la suite d'une perturbation de faible amplitude. Ainsi le niveau de stabilité d'un attracteur est proportionnel à la durée de ce temps de relaxation (Kelso & Schöner, 1988). Suivant cette logique, le temps pris par le système pour retrouver le pattern en anti-phase après une perturbation doit devenir de plus en plus important dans un protocole d'incrémentement de la fréquence d'oscillation.

Après avoir déterminé la fréquence critique relative à chacun des 5 sujets, Scholz *et al.* (1987) proposèrent un protocole d'incrémentement de la fréquence d'oscillation de 0.2 Hz toutes les 10 secondes sur 9 paliers, au cours desquels une perturbation était aléatoirement générée par une force de torsion (*torque pulse*) de 50ms sur la flexion de l'index droit. Au cours de l'expérimentation, chaque palier était perturbé 10 fois (mais une fois par essai). La fréquence du palier de départ correspondait à la fréquence critique moins 1 Hz. Le temps de relaxation était estimé par la différence entre le temps où la phase relative s'était de nouveau stabilisée sur la valeur moyenne observée avant la perturbation et la fin temporelle de la force de torsion. Leurs résultats montrèrent que le temps de relaxation du pattern en anti-phase était significativement plus important que celui du mode de coordination en phase, excepté pour les fréquences les plus faibles. Qui plus est, une interaction mode de coordination \times fréquence indiquait que le temps de relaxation du pattern en anti-phase augmentait avec l'augmentation de la fréquence, alors qu'il avait tendance à diminuer pour l'attracteur 0° .

Une fois encore, ces résultats expérimentaux confirment les propriétés dynamiques stochastiques des coordinations motrices et rendent compte de la pertinence de l'interprétation et de la compréhension du problème du contrôle moteur sous l'angle qualitatif des théories des systèmes dynamiques non linéaires. En outre, les outils mathématiques sous-jacents à ces théories ont permis de développer des modèles théoriques de la dynamique des coordinations motrices (Haken *et al.*, 1985; Schöner *et al.*, 1986).

4- Modèles théoriques de transition de phase des coordinations bimanuelles

4-1 Le modèle “ déterministe ” de Haken, Bunz et Kelso (1985)

Le présent modèle, de vertu qualitative, a pour but de rendre compte de la présence des deux patterns comportementaux spontanés du système de coordinations bimanuelles, les attracteurs en phase et en anti-phase, de la transition de phase entre ces deux attracteurs, de la déplétion du pattern en anti-phase, et de la persistance du pattern en phase au-delà de cette transition (Kelso, 1981b; Kelso, 1984; Scholz et Kelso, 1985).

Pour rendre compte des relations spatio-temporelles des effecteurs impliqués dans la tâche bimanuelle, la différence de phase ϕ est posée comme paramètre d'ordre du système. Sa dynamique est alors caractérisée par une équation différentielle :

$$\dot{\phi} = \frac{dV(\phi)}{d\phi} \quad (3)$$

où $V(\phi)$ spécifie une fonction de potentiel, dont la représentation dans le plan $(\phi, V(\phi))$ est appelée *le paysage des attracteurs*. A ce niveau, Haken *et al.* (1985) posent plusieurs hypothèses concernant cette fonction de potentiel $V(\phi)$.

4-1-1 Conditions périodiques et symétriques

Soit un espace des phases (o, x, \dot{x}) , où (o, x) et (o, \dot{x}) représentent respectivement l'axe des positions et l'axe des vitesses correspondantes d'un index. Puisqu'une phase θ se définit mathématiquement par l'angle formé par (o, x) et la droite passant par l'origine o et un point de coordonnées (x, \dot{x}) , cet angle peut s'exprimer sous forme de fonctions cosinus ou sinus (avec $(o, x) = \cos\theta$ et $(o, \dot{x}) = \sin\theta$). Cette définition mathématique indique que ϕ est équivalent à $\phi + 2\pi$, mettant en évidence le caractère *périodique* de la fonction de potentiel, $V(\phi)$ ou $V(\phi + 2\pi)$. En conséquence, Haken *et al.* (1985) introduisent facilement le rôle *symétrique* des deux index impliqués dans la tâche bimanuelle, à savoir que $\phi = \theta_1 - \theta_2$ est égal à $\phi = \theta_2 - \theta_1$ (θ_1 et θ_2 représentent les phases des deux index). Cette condition de symétrie signifie que $V(\phi) = V(-\phi)$.

4-1-2 La fonction de potentiel, $V(\phi)$

Cette fonction de potentiel se caractérise par deux termes cosinus :

$$V(\phi) = -a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) \quad (4)$$

où a et b représentent les paramètres de l'équation tels que la dynamique de leur rapport capture la stabilité ou la perte de stabilité des patterns en phase et en anti-phase. Le signe moins permet juste une représentation du paysage des attracteurs de cette fonction de potentiel sous la forme métaphorique de collines et de vallées. Il devient alors aisé de comprendre que les vallées (i.e. les minima de l'équation) correspondent aux attracteurs du système, alors que les collines (i.e. les maxima) symbolisent les repellants (Mitra, Amazeen & Turvey, 1998, p. 28).

Pour capturer ces différents états d'équilibre stables et le phénomène de transition de phase, il suffit de rechercher les minima de l'équation (3), à savoir lorsque:

$$\dot{\phi} = -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) = 0 \quad (5)$$

Suivant les différentes formules trigonométriques et la mise en facteur de $\sin(\phi)$ ⁸, l'équation (5) devient :

$$\sin(\phi) [(-a - 4b \cos(\phi))] = 0 \quad (6)$$

Deux solutions s'offrent alors :

- 1) soit $\sin(\phi) = 0$, alors $\phi = 0$ ou $\phi = \pm \pi$, ce qui rend compte des deux attracteurs du système.
- 2) soit $-a - 4b \cos(\phi) = 0$ ou $\cos(\phi) = a/4b$. Puisque la transition survient quand $\phi = 0$, deux minima (pour $\phi = 0$ et $\phi = \pi$) persistent lorsque $b/a > 0.25$, alors que seul un minimum peut être déterminé pour $b/a < 0.25$, à savoir $\phi = 0$.

Ce modèle traduit relativement correctement les données expérimentales observées dans la littérature (cf. point 3-1-2, p. 26). Comme nous le représente le paysage des attracteurs (figure 2), l'augmentation progressive de la fréquence d'oscillation (modélisée par la dynamique du rapport b/a) influence la dynamique des deux attracteurs de la tâche bimanuelle ($\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$). Mais ce modèle

déterministe ne permet pas de rendre compte du caractère stochastique des coordinations bimanuelles. En occultant cette propriété fondamentale, on ne peut pas comprendre pourquoi la transition de phase intervient lorsque le rapport b/a est inférieur à 0.25. En effet, bien que devenu repellant, le pattern en anti-phase pourrait théoriquement être maintenu si aucune fluctuation n'était envisagée.

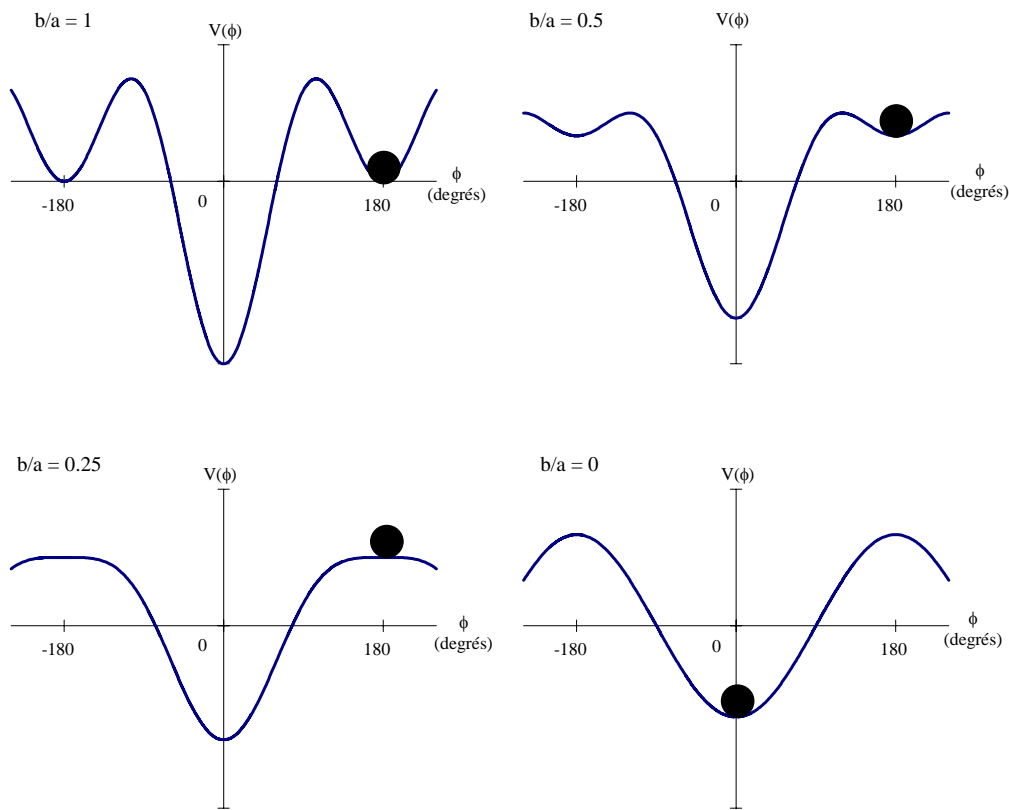


Figure 2 : Représentation du paysage des attracteurs en fonction de l'augmentation de la fréquence d'oscillation capturée par l'évolution du rapport b/a .

4-2 Le modèle " stochastique " de Schöner, Haken et Kelso (1986)

4-2-1 L'équation stochastique

D'une manière générale, " les fluctuations d'un système macroscopique sont le résultat des efforts antagonistes des impulsions perturbatrices qui ont tendance à éloigner le système de son équilibre et de la tendance du système à tendre vers son équilibre dans son évolution libre " (Blanc-Lapierre & Fortet, 1953, p. 34).

⁸ A savoir $\sin 2a = 2\sin a \cos a$ d'où $2b\sin(2\phi) = 4b \sin(\phi)\cos(\phi)$.

Or, comme nous l'avons déjà signalé, la dynamique des coordinations bimanuelles se doit de souligner l'influence de ces fluctuations aléatoires dues aux interactions à l'intérieur et entre les sous-systèmes (i.e. les multiples degrés de liberté), qui ne sont pas capturées par le paramètre d'ordre, la phase relative. Dans ce cadre, Schöner *et al.* (1986) ont modélisé ces fluctuations dans l'équation (3) déterministe de Haken *et al.* (1985) :

$$\dot{\phi} = \frac{dV(\phi)}{d\phi} + \sqrt{Q} \xi_t \quad (7)$$

où ξ_t représente un processus gaussien de bruit blanc, avec $Q (> 0)$ la force de ce bruit et

$$\langle \xi_t \rangle = 0 \text{ et } \langle \xi_t \xi_{t'} \rangle = \delta(t - t') \quad (8)$$

où la fonction⁹ $\delta(t - t') = 0$ si $t = t'$, $\delta(t - t') \neq 0$ si $t \neq t'$.

Ce modèle décrit un processus stochastique dynamique (c'est-à-dire un processus à loi temporelle pour lequel une fonction de répartition peut être définie) de type processus de Markov permanent continu. Issu des travaux sur le mouvement brownien d'une particule libre de Langevin (1908) (cf. Kac & Logan, 1979), ce processus ne se caractérise plus alors que par diverses distributions de probabilité. L'étude de ces dernières constitue une condition fondamentale si nous désirons définir les différents états du système au temps t_0, t_1, t_2, \dots (où $t_0 < t_1 < t_2$), ou d'une manière générale lorsque le temps vers l'infini. En effet, nous verrons ultérieurement que ce positionnement théorique se justifie bien au-delà des fondements mathématiques, tant le caractère fluctuant d'un système dynamique joue un rôle significatif dans la prédiction son comportement (Prigogine, 1994).

4-2-2 Incidences stochastiques

Cette partie n'a pas pour but de démontrer le lien entre les données expérimentales des études sur les coordinations bimanuelles (Kelso, 1984, Scholz & Kelso, 1985, Scholz *et al.*, 1987; Scholz & Kelso, 1989) et les développements

⁹ identique aux fonctions de Dirac qui ont pour propriétés de s'annuler partout sauf en seul point.

mathématiques théoriques du modèle stochastique de Schöner *et al.* (1986)¹⁰, mais de justifier de l'importance des échelles temporelles d'observation.

De par la présence de bruit dans le système, le système doit disposer d'un temps suffisant pour s'auto-organiser et "présenter" divers états stables. Dans la même logique, l'absence de transition de phase n'indique pas forcément de la forte stabilité du système (ce qui peut être le cas), mais d'un temps d'observation insuffisant (Newell, 1991; Schöner *et al.*, 1992). Méthodologiquement, trois échelles temporelles doivent ainsi être distinguées : le *temps de relaxation*, le *temps d'observation* et le *temps d'équilibration*.

4-2-2-1 Le temps de relaxation

Cette première échelle mesure le temps que le système, positionné sur un attracteur du système ($\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$), prend pour revenir vers cet attracteur après une petite perturbation telle que le changement de fréquence. Le temps maximal, dit de relaxation locale, τ_{rel} , correspond alors à la durée du cycle de mouvement, cette durée étant relative de la fréquence imposée. Sur cette base, Schöner *et al.* (1986) estiment qu'un temps de relaxation $\tau_{rel} = 0.25$ secondes constitue une échelle d'observation des fluctuations pertinentes pour rendre des effets de ces petites perturbations.

4-2-2-2 Le temps d'observation

Ce temps d'observation, τ_{obs} , correspond au temps sur lequel les mesures et les moyennes du paramètre d'ordre sont réalisées. Il correspond à la différence entre le temps où le paramètre de contrôle change de valeur (temps définissant une échelle temporelle expérimentale, τ_p) et le temps de relaxation. Ainsi sur les protocoles d'incrémentations de la fréquence d'oscillation tous les paliers de 4 secondes (e.g., Kelso et Scholz, 1985), le temps *maximal* d'observation était égal à 3,75 secondes ($\tau_{obs} = \tau_p - \tau_{rel}$).

4-2-2-3 Le temps d'équilibration

Ce temps d'équilibration (ou *temps de relaxation globale*), τ_{equ} , correspond au temps qu'un système stochastique prend pour que la fonction de densité (i.e.

¹⁰ Pour cela, voir Schöner *et al.* (1986) pp. 250-256.

distribution de probabilité) soit stationnaire. Cette fonction de probabilité, qui associe à chaque solution possible de ϕ , variable aléatoire, une probabilité d'être comprise en $[-\pi, \pi]$, est dite stationnaire lorsqu'elle est égale à 0. Le temps pris pour qu'une distribution initiale de probabilité devienne une distribution stationnaire est ainsi dit d'équilibration. Mais de par le caractère bruité du système, ce temps d'équilibration tend en théorie vers l'infini. Quand bien même le système est fortement installé sur un attracteur, il existe toujours une probabilité, certes infime, que n'importe quel état du système soit adopté. Cette condition, appelée la stationnarité locale (*local stationarity*) (Schöner *et al.*, 1992, p. 34) infère que

$$\tau_{\text{rel}} < \tau_{\text{obs}} < \tau_{\text{equ}}$$

ce qui implique que les états stables du système peuvent être étudiés par les distributions de probabilité locales, spécifiques à chacun des attracteurs (cf. Schöner *et al.*, 1986, pp. 251-253), et ceci pour une dynamique où aucune transition de phase n'est observée. Dans ce cas, le concept du *temps moyen du premier passage* (*mean first passage time*) du pattern en anti-phase vers le pattern en phase (le système étant initialement installé sur l'attracteur 180°) est une mesure du temps d'équilibration. Son évaluation théorique (Schöner *et al.*, 1986, p. 255, éq. (4.26)) confirme la relation des différentes échelles temporelles.

En revanche, lors de la transition de phase, le temps d'équilibration tombe au niveau du temps d'observation tandis que le temps de relaxation relatif à la perturbation du pattern en anti-phase tend à se rapprocher de ce même temps d'observation. Ceci implique l'étude de l'évolution temporelle de la distribution de probabilité, $P(\phi, t)$, du pattern en anti-phase, par l'intermédiaire de l'équation de Fokker-Plank (e.g., Ash & Gardner, 1975, chap. 5; Gardiner, 1985, chap. 3) :

$$\dot{P}(\phi, t) = \frac{\partial}{\partial \phi} \{V(\phi)P(\phi, t)\} + \frac{Q}{2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} P(\phi, t) \quad (9)$$

Cette équation permet également la détermination des temps de transition, τ_{swich} , (*switching time*) dont l'estimation théorique, $\tau_{\text{swich}} = 2.5$ secondes (Schöner *et al.*, 1986, p. 256) correspond aux résultats expérimentaux observés par Scholz *et al.* (1987).

4-2-2-4 Conclusions

Les différentes exigences théoriques soumises par Kelso et Schöner (1988, p. 41-42) pour rendre compte de la stabilité ou de la perte de stabilité des patterns de coordination ont été fortement confirmées par la pertinence des deux présentes modélisations de la dynamique de la tâche bimanuelle. Elles confirment :

(1) que la dynamique d'un paramètre d'ordre, la phase relative, permet de caractériser deux patterns comportementaux, le pattern en phase ($\phi = 0^\circ$) et le pattern en anti-phase ($\phi = 180^\circ$).

(2) que le comportement peut transiter du pattern en anti-phase vers le pattern en phase, sous l'influence d'un paramètre de contrôle, la fréquence d'oscillation (cf. l'effet de la dynamique des paramètres a et b sur la transition de phase).

(3) que les fluctuations (i.e. ξ_t) sont fondamentales dans la mesure du niveau de stabilité des états stables et dans la compréhension du phénomène de transition de phase.

(4) que ces fluctuations peuvent être appréhendées sur diverses échelles de temps, ce qui induit explicitement des positionnements théoriques et méthodologiques essentiels sur l'étude des effets complexes du système de contraintes.

Mais il est important de relever que l'équation de la fonction de potentiel peut être dérivée à partir des équations représentant les mouvements oscillatoires de chacun des effecteurs impliqués dans la tâche bimanuelle et leur couplage (Haken *et al.*, 1985; Kelso *et al.*, 1981, p. 351). L'étude dynamique de tels oscillateurs permet de mieux définir les relations entre les différents niveaux du système (i.e. neural, musculaire, articulaire, etc...) et de mieux comprendre comment s'opère la réduction de ces degrés de liberté (Kelso & Schöner, 1988). C'est pour répondre à ces attentes que Kay *et al.* (1987) ont proposé un *modèle cycle limite* des coordinations bimanuelles.

4-3 Le modèle cycle limite de Kay, Kelso, Saltzman et Schöner (1987)

Sur la base de l'analyse des relations entre l'amplitude, la fréquence, le pic de vitesse et la phase relative issus de la réalisation de mouvements rythmiques uni et/ou bimanuels, Haken *et al.* (1985) et Kay *et al.* (1987) montrent que les transitions de

phase peuvent être comprises par la dynamique des deux effecteurs impliqués, plus exactement par des modèles d'oscillateurs couplés non linéaires. L'hypothèse sous-jacente aux équations résultantes de ces modèles est soutenue par le fait que le couplage des effecteurs qui constituent le système de coordination est médié par le système nerveux central (e.g., Kugler & Turvey, 1987). Il rend compte d'une dynamique de type cycle limite pour produire un mouvement rythmique, exprimant le principe d'esclavage entre l'ordre macroscopique et tous les composants du système (e.g., Beek, Peper & Stegeman, 1995; Haken, 1983; Saltzman & Kelso, 1987).

4-3-1 Les oscillateurs non-linéaires auto-entretenus

Les oscillateurs sont modélisés par des équations différentielles ordinaires de second ordre telles que (e.g., Beek, Rikkert & Van Wieringen, 1996) :

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = 0 \quad (10)$$

où x représente la position de l'oscillateur et les notations dot les dérivées premières (\dot{x} , la vitesse) ou secondes de cette position (\ddot{x} , l'accélération). Le premier terme correspond à l'inertie du système, $f(x, \dot{x})$ exprime la fonction d'amortissement et $g(x)$ la fonction de raideur. En ce sens, un attracteur périodique (i.e. un cycle limite, dont les trajectoires peuvent être représentées dans l'espace des phases (x, \dot{x})) se définit par un juste échange entre les pertes et les injections d'énergie dans le système régulées par la fonction d'amortissement. Ce type de comportement s'exprime seulement si cette fonction est non linéaire, c'est-à-dire si le paramètre d'amortissement est fonction d'au moins une variable du système. Deux types d'oscillateurs sont alors susceptibles de rendre compte des termes d'amortissement non linéaire de l'équation (10) : l'oscillateur Van der Pol et/ou l'oscillateur Rayleigh.

4-3-1-1 L'oscillateur type Van der Pol (1922)

Cet oscillateur a été décrit par l'équation de mouvement :

$$\ddot{x} + \alpha\dot{x} + \gamma x^2 \dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (11)$$

où α , γ et ω^2 sont des constantes. Cette équation correspond à un attracteur cycle limite pour $\alpha < 0$ et $\gamma > 0$. Si on met \dot{x} en facteur, $-\dot{x} (1 - x^2)$, on s'aperçoit que la perte et

l'injection d'énergie (dont l'équilibre est la condition requise pour un comportement périodique) sont dépendantes de la position, avec $-\dot{x}$ représentant un amortissement linéaire négatif et $x^2 \dot{x}$ le terme Van der Pol. Ainsi l'énergie est injectée quand $|x| < 1$, alors qu'il y a perte d'énergie pour $|x| > 1$.

4-3-1-2 L'oscillateur type Rayleigh (1877/1945)

Cet oscillateur a pour équation de mouvement :

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + \beta \dot{x}^3 + \omega^2 x = 0 \quad (12)$$

où un attracteur cycle limite peut être décrit pour $\alpha < 0$ et $\beta > 0$. Par le même principe de factorisation de \dot{x} , $-\dot{x}(1 - \dot{x}^2)$, on s'aperçoit que les relations d'énergie du système sont dépendantes de la vitesse, avec \dot{x}^2 comme terme de Rayleigh.

4-3-2- Modélisation des oscillateurs de la tâche bimanuelle

Ainsi comme le soulignent Beek et Beek (1988), chaque terme d'amortissement et de raideur représentant des oscillations non linéaires peuvent se caractériser par une série de termes, appelée séries de Taylor, de type $x_p \dot{x}_q$ ($p, q : 0, 1, 2, 3, \dots$), telle que la fonction de raideur doit être composée des termes de Duffing (x^1, x^3, x^5, \dots), et les fonctions d'amortissement $f(x, \dot{x})$ de termes de Van der Pol (x^0, x^2, x^4, \dots) et/ou de termes de Rayleigh ($\dot{x}^0, \dot{x}^2, \dot{x}^4, \dots$).

En manipulant 6 fréquences d'oscillation (de 1Hz à 6Hz) dans une tâche de mouvements rythmiques unimanuels et bimanuels, Kay *et al.* (1987) montrèrent une relation linéaire entre l'augmentation de la fréquence et (1) la diminution de l'amplitude des mouvements requis et (2) l'augmentation du pic de vitesse des oscillateurs. La correspondance de ces observations et de la connaissance mathématique des différents oscillateurs non linéaires d'un système physique leur permet de modéliser la dynamique des effecteurs impliqués sous la forme :

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + \beta \dot{x}^3 + \gamma x^2 \dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad (13)$$

Pour $\beta, \gamma > 0$ et $\alpha < 0$, ce modèle dit *hybride* rapporte un attracteur cycle limite de fréquence ω pour $|\alpha| \leq \omega$ (Kay *et al.*, 1987, p. 185), combinant un terme d'amortissement Van der Pol ($x^2 \dot{x}$) et un terme d'amortissement Rayleigh (\dot{x}^3). Cette combinaison provient de deux propriétés spatio-temporelles bien distinctes (Beek *et al.*, 1996, p. 1079) :

(1) L'augmentation de la fréquence induit une augmentation du pic de vitesse pour un oscillateur Van der Pol, alors que l'amplitude de mouvements reste constante.

(2) L'augmentation de la fréquence induit une diminution de l'amplitude pour un oscillateur Rayleigh, alors que le pic de vitesse reste constant.

Mais l'hypothèse principale de ce modèle hybride est que la raideur linéaire ($g(x) = \omega^2 x$), associée à la fréquence ω , est le seul paramètre contrôlé par le système nerveux, ce qui implique que les paramètres d'amortissement non linéaire sont indépendants de la fréquence de mouvement (Haken *et al.*, 1985; Kay *et al.*, 1987). Cette hypothèse laisse donc sous-entendre que les transitions de phase observées dans les coordinations motrices ne peuvent être expliquées par les modifications des propriétés dissipatives des oscillateurs impliqués dans le système. Elles seraient davantage dues à la dynamique du couplage (i.e. de l'interaction) entre les oscillateurs. C'est dans cette perspective que Haken *et al.* (1985), à la suite de leur modélisation de la dynamique de la phase relative (équation 3), ont proposé un modèle d'équations d'oscillateurs couplés.

4-4 Le modèle des oscillateurs couplés de Haken, Kelso et Bunz (1985)

4-4-1 Introduction

Bien que la fonction de potentiel (équation 4) permet de rendre compte du phénomène de transition de phase du pattern en anti-phase vers le pattern en phase lorsque la fréquence d'oscillation atteint une valeur critique (pour un rapport $b/a < 0.25$), ce niveau macroscopique d'analyse n'indique pas clairement *pourquoi* ce rapport b/a est affecté par la fréquence. Pour répondre à cette interrogation, Haken *et al.* (1985)

proposent un système d'équations qui décrivent la cinématique des mouvements des deux effecteurs j :

$$\ddot{x} + f(x_1, \dot{x}_1) + g(x_1) = I_{12}(x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2) \quad (14)$$

$$\ddot{x} + f(x_2, \dot{x}_2) + g(x_2) = I_{21}(x_2, \dot{x}_2, x_1, \dot{x}_1) \quad (15)$$

où x_j ($j = 1, 2$) représente la position d'un effecteur, les notations dot les diverses dérivées. Chaque équation caractérise le comportement d'un effecteur sous la forme d'un oscillateur hybride, avec un terme d'amortissement Van der Pol ($x^2 \dot{x}$) et Rayleigh (\dot{x}^3) (Kay *et al.*, 1987).

La dynamique des fonctions de couplage (i.e. d'interactions mutuelles entre les deux oscillateurs), I_{12} et I_{21} , est alors caractérisée par la dérivée de l'équation du paramètre d'ordre pour le système des oscillateurs couplés. Les deux techniques de dérivations utilisées pour définir ce couplage, les dérivées temporelles (*time derivatives*) ou les délais temporels (*time delays*) (Haken *et al.*, 1985, pp. 351-353; Peper & Beek, 1998a, appendice p. 90), montrent que l'augmentation de la fréquence d'oscillation s'accompagne d'une chute de l'amplitude. Mais il est important de noter que les équations résultantes (cf. éq. 16 et 17) de chacune de ces deux techniques ne sont pas identiques, ce qui n'est pas sans conséquence sur la compréhension de la dynamique des coordinations bimanuelles (Peper & Beek, 1998b; 1999).

4-4-2 Modèle d'oscillateurs couplés selon les *dérivées temporelles*

Sans entrer dans les développements mathématiques assez complexes (Kelso, 1984; Kelso *et al.*, 1987; Kay *et al.*, 1987), cette dérivation admet pour résultat l'équation :

$$\dot{\phi} = (\alpha + 2\beta r^2) \sin \phi - \beta r^2 \sin(2\phi) \quad (16)$$

où r représente l'amplitude effective des oscillations et α et β des paramètres supposés constants. Ainsi par correspondance à l'équation (5), l'équation (16) exprime la même dynamique si $\alpha + 2\beta r^2 = -a$ et $\beta r^2 = b$. Ceci induit que la transition de phase observée entre le pattern 180° et le pattern 0° survient pour une amplitude critique $r_c = \sqrt{-\alpha/4\beta}$ ($\alpha < 0$). Ceci signifie que la fréquence n'affecte pas directement la stabilité des patterns de coordination. Son influence passe tout d'abord par la chute de l'amplitude, qui est due à la présence d'un terme d'amortissement Rayleigh dans la modélisation des oscillateurs impliqués (cf. point 4-3-2, p. 39).

4-4-3 Modèle d'oscillateurs couplés selon les *délais temporels*

En incorporant une fonction de délai temporel (*time delay fonction*), qui suppose une dépendance du couplage entre les deux oscillateurs au temps t avec leurs positions atteintes à des temps précédents τ^{11} , l'équation (5) prend alors la forme :

$$\dot{\phi} = -\frac{1}{\omega^2} \left[(\alpha + 6\beta r^2) \sin \phi - 3\beta r^2 \sin(2\phi) \right] \quad (17)$$

où ω représente la fréquence d'oscillation. Cette dérivation révèle que la stabilité des patterns comportementaux dépend des paramètres α et β , de l'amplitude r , mais aussi également de la fréquence ω . Mais du fait même que les deux termes sinus soient affectés par la fréquence de façon identique, il n'est pas attendu que le pattern en anti-phase soit plus annihilé que le pattern en phase. Par conséquent, la "disparition" (la perte de stabilité provoquant la transition de phase) de l'attracteur en anti-phase est expliquée par la diminution de l'amplitude, elle-même associée à l'augmentation de la fréquence. La transition de phase apparaît alors pour une amplitude critique $r_c = \sqrt{-\alpha/12\beta}$ ($\alpha < 0$).

4-4-4 Conclusions

Les deux versions de la dynamique du couplage des oscillateurs issus du modèle de Haken *et al.* (1985) supposent une relation inverse entre la fréquence et l'amplitude de mouvement, capturée par le terme d'amortissement de Rayleigh impliqué dans les

¹¹ En d'autres termes, cette fonction suppose que l'influence du couplage diminue de manière exponentielle avec l'augmentation des délais temporels ($t - \tau$) (voir Peper & Beek, 1998a).

oscillateurs. Pourtant leurs développements théoriques n'impliquent pas les mêmes interprétations du phénomène de transition de phase. Les *dérivées temporelles* supposent que l'effet de la fréquence est pleinement médié par les diminutions de l'amplitude, alors les *délais temporels* montrent une dépendance directe de la stabilité des patterns avec la fréquence de mouvement.

Mais Peper et Beek (1998a, 1998b, 1999) montrent que les résultats expérimentaux ne supportent que très peu les prédictions du système d'équations différentielles couplées, quelle que soit la version testée. Que ce soit dans une tâche de poursuite rythmique unidirectionnelle (Peper & Beek, 1998b) ou dans une tâche de tapping où un rapport de fréquences 2:3 était manipulé (une main devant réaliser 2 mouvements de tapping pendant que l'autre en réalise 3, et ceci dans un même cycle de fréquence; Peper & Beek, 1998a), il a été démontré que la force de couplage et la stabilité des patterns de coordination étaient sous la dépendance inverse de la fréquence d'oscillation. En effet, des transitions de phase induites par l'augmentation de la fréquence ont été observées même lorsque l'amplitude de mouvement *augmentait* au cours de l'essai.

Dans ce cas, même si la version des *délais temporels* semble plus résistante (bien qu'elle suppose également que la transition de phase doit être précédée d'une diminution de l'amplitude, cf. point 4-4-2), la transition de phase apparaîtrait lorsque la stabilité du pattern en anti-phase devient trop faible pour résister aux fluctuations stochastiques (Schöner *et al.*, 1986). Peper et Beek (1999) suggèrent que cette relation inverse entre la fréquence d'oscillation et l'amplitude ne jouerait pas un rôle fondamental dans les processus neurophysiologiques (cf. l'hypothèse de départ, point 4-3 ou Kelso & Jeka, 1992, p. 645) qui sous-tendent les coordinations. Cette relation proviendrait d'effets de filtrage des propriétés biomécaniques et neuromusculaires des oscillateurs, dont la modélisation distinguerait une dynamique centrale (i.e. au niveau du système nerveux central) et une dynamique périphérique (i.e. au niveau des effecteurs du système) (Peper & Beek, 1999, p. 277-278).

4-5 Extensions du modèle stochastique de Schöner, Haken et Kelso (1986)

4-5-1 L'effet magnétique de Von Holst (1939/1973)

Dans les divers modèles présentés précédemment, la dynamique des coordinations motrices a été capturée dans le cas de synchronisation absolue des phases et des fréquences. Sous ces conditions, seuls les patterns en phase et en anti-phase émergent spontanément du système de contraintes pesant sur la tâche bimanuelle. Mais dans les systèmes vivants, il existe de nombreux exemples où ces synchronisations sont brisées sous l'effet de propriétés différentes des effecteurs impliquées dans l'émergence de l'ordre macroscopique du système. L'exemple du biologiste Von Holst (1939/1973) sur l'étude des mouvements rythmiques des nageoires de poissons en a démontré toute l'importance.

Il a mis en évidence que la coordination entre les différentes nageoires du poisson *Labrus* dépendait de deux effets. Le premier effet est représenté par la tendance qu'ont les différentes nageoires, d'inertie différente, à rythmer leurs mouvements selon leur propre fréquence. En revanche, le second effet observé, appelé l'effet magnétique (*magnet effect* ou *M-effect*) exprime une attraction mutuelle (*mutual entrainment*) des fréquences de mouvement de chaque nageoire. En d'autres termes, les nageoires ont tendance à synchroniser leurs fréquences. Deux formes de synchronisations sont alors possibles :

- (1) Les fréquences propres de chaque oscillateur sont identiques (ou *quasi* identiques¹²), alors le système présente un rapport de fréquence absolue 1:1. Cette condition caractérise une coordination absolue (*absolute coordination*).
- (2) Les fréquences propres sont fortement contraintes par les conditions inhérentes¹³ au système, de telle façon que d'autres formes de synchronisation apparaissent. Les rapports de fréquences peuvent alors être plus ou moins complexes (2:1; 3:2; 5:8, etc...), ce qui définit une coordination relative (*relative coordination*).

Ainsi les modélisations de la dynamique de la tâche bimanuelle ne peuvent occulter ces observations et se doivent de rendre compte des effets des fréquences propres des oscillateurs.

¹² En effet, dans un monde où la non linéarité s'inscrit comme caractéristique fondamentale, il est difficilement envisageable de trouver des rapports de fréquence 1:1 stricto sensu absolu. Ce qu'il faut retenir est que la différence des fréquences propres des oscillateurs tend vers 0.

¹³ Se référer à la définition de Bingham (1988), point 2, p. 22.

4-5-2 Modélisation des fréquences propres des oscillateurs

Sur la base des modèles de Haken *et al.* (1985) et de Schöner *et al.* (1986), afin de rendre compte des effets des fréquences propres des oscillateurs, la dynamique des coordinations bimanuelles a été étendue par Kelso *et al.* (1990) :

$$\dot{\phi} = \Delta\omega - a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) + \sqrt{Q}\xi_t \quad (18)$$

où $\Delta\omega$ mesure la différence des fréquences propres (ω_j , ($j = 1, 2$)). De nombreuses études ont testé les effets de ce paramètre $\Delta\omega$, tout particulièrement en modifiant les propriétés d'inertie des oscillateurs impliqués dans des tâches de coordinations bimanuelles (e.g., Kelso, 1994; Kelso & Jeka, 1992; Kugler & Turvey, 1987; Schmidt *et al.*, 1990; Schmidt & Turvey, 1995; Turvey, Roseblum, Schmidt & Kugler, 1986). Tous les résultats montrent que $\Delta\omega$ constitue un autre paramètre de contrôle, qui déstabilise la dynamique du système d'oscillateurs.

Plus précisément, les décalages de phase réellement observés tendent à s'écarter de la valeur attendue ($\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$) lorsque $\Delta\omega$ devient important. Par exemple, Schmidt, Beek, Treffner et Turvey (1991) ont démontré que la déviation moyenne de la phase relative estimée par rapport à coordination requise était nettement plus importante pour $\Delta\omega \cong 1$ que pour $\Delta\omega \cong 0$. Qui plus est, ces déviations étaient d'autant plus importantes que la fréquence d'oscillation était importante (Schmidt, Shaw & Turvey, 1993), indiquant un effet " additif " des deux paramètres de contrôle.

Pour résumer les conséquences de ce paramètre de contrôle sur la dynamique des coordinations bimanuelles, plusieurs points peuvent être relevés (e.g., Amazeen, Sternad & Turvey, 1996; Sternad, Turvey & Schmidt, 1992; Treffner & Turvey, 1995, 1996; Turvey & Schmidt, 1994) :

- (1) Lorsque $\Delta\omega = 0$, les états stables du système sont observés à $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$.
- (2) Lorsque $\Delta\omega = 0$, l'état à $\phi = 0^\circ$ est plus stable que l'état à $\phi = 180^\circ$.
- (3) Lorsque $\Delta\omega \neq 0$, les états stables sont différents de 0° et de 180° .

(4) Lorsque $\Delta\omega \neq 0$, l'écart de l'état stable par rapport à 180° est plus important que celui observé par rapport à 0° .

(5) Lorsque $\Delta\omega \neq 0$, la stabilité des états adoptés est d'autant plus faible que $\Delta\omega$ est important.

(6) Lorsque $\Delta\omega \neq 0$, les déviations de ϕ par rapport à 0° ou 180° sont d'autant plus importantes que le rapport b/a tend vers 0.

4-6 Conclusions

Comme nous avons pu le voir, la dynamique des coordinations motrices a bien été décrite, observée et modélisée dans le cadre théorique des systèmes dissipatifs complexes non linéaires, issu des principes de la synergetique (Haken, 1983). L'observation de deux patterns de coordination spontanément stables, le pattern en phase et le pattern en anti-phase, a été caractérisée par un paramètre d'ordre, la phase relative ϕ , dont la dynamique, dite intrinsèque, est représentée par un paysage des attracteurs (Haken *et al.*, 1985; Kelso, 1981b, Kelso, 1984). Les niveaux de stabilité de ces attracteurs peuvent être mesurés, et interprétés grâce aux propriétés stochastiques du système (Scholz & Kelso, 1985; Scholz *et al.*, 1987, Schöner *et al.*, 1986). Cette propriété fondamentale, selon diverses échelles temporelles d'observation, permet de rendre compte de la perte de stabilité des attracteurs, du phénomène de transition de phase, et de l'évolution du couplage des oscillateurs impliqués (Kay *et al.*, 1987; Peper & Beek, 1999), et ceci sous les effets de différentes contraintes non spécifiques au système, les paramètres de contrôle.

Mais comme nous l'avons déjà laissé sous-entendre, certaines conditions expérimentales (sous forme d'instructions verbales, de retour d'informations, d'un aménagement du dispositif, etc...) peuvent induire directement le pattern comportemental à réaliser. Ces contraintes, conceptualisées sous le terme d'*information comportementale* (Schöner & Kelso, 1988a, 1988c), ont pour vertu de se situer au même niveau macroscopique que le paramètre d'ordre et de participer pleinement à l'émergence du comportement, quelle que soit la nature des effets perturbateurs qu'elles induisent.

5- L'information comportementale

5-1 Influence théorique de l'information comportementale

Sur la base de la connaissance de la dynamique intrinsèque des patterns de coordination bimanuelle (i.e. ceux réalisés sans influence directe de l'environnement), il a été démontré qu'une dynamique comportementale, issue de contraintes liées à un apprentissage, à la mémoire, à la perception ou bien encore à des actions intentionnelles, pouvait également être capturée (e.g., Scholz & Kelso, 1990; Schöner & Kelso, 1988a, 1988c, 1988d; Serrien & Swinnen, 1999; Tuller & Kelso, 1989; Yamanishi *et al.*, 1980; Zanone & Kelso, 1992, 1994). Ces contraintes spécifiques ou *informations comportementales*, notées ψ , conceptualisent le pattern de coordination requis, exigé, et ceci dans la même métrique et au même niveau macroscopique que le paramètre d'ordre, ϕ .

La manipulation de ces informations comportementales se traduit alors par une modification de la dynamique intrinsèque (F_{intr}) de la phase relative :

$$\dot{\phi} = F_{\text{intr}} + \sum c_{\text{inf}} F_{\text{inf}}(\phi_t, t) \quad (19)$$

où Σ représente la somme des différentes informations comportementales potentielles, et $c_{\text{inf}} (> 0)$ l'importance relative de ces informations dans la dynamique résultante du système (i.e. la force de la perturbation F_{inf}). En d'autres termes, pour caractériser la participation d'une *seule* information comportementale, ψ , dans la dynamique de la tâche bimanuelle, l'équation s'écrit alors :

$$\dot{\phi} = F_{\text{intr}} + c_{\text{inf}} F_{\text{inf}}(\phi_t, t) \quad (20)$$

où $c_{\text{inf}} F_{\text{inf}}(\phi_t, t)$ représente la tendance attractive de la phase relative ϕ_t vers le comportement requis, ψ :

$$c_{\text{inf}} F_{\text{inf}}(\phi_t, t) = -c_{\text{inf}}(\phi_t - \psi) \quad (21)$$

Par exemple, dans les expérimentations sur des tâches de coordination bimanuelle, l'influence de ψ caractérisée soit (1) par un environnement perceptif (ψ_{env}) sous la forme de différents décalages entre deux métronomes visuels (Tuller & Kelso,

1989, cf. point 3-1-2), soit (2) par une mémorisation (ψ_{mem}) de différents décalages préalablement appris (Yamanishi *et al.*, 1980), se modélise respectivement¹⁴ :

$$\dot{\phi} = -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) - c_{env} \sin(\phi - \psi_{env}) \quad (22)$$

$$\dot{\phi} = -a \sin(\phi) - 2b \sin(2\phi) - c_{mem} \sin(\phi - \psi_{mem}) \quad (23)$$

5-2 Interprétations

Les conséquences de l'influence de ces informations comportementales sur la dynamique des coordinations sont multiples (Schöner & Kelso, 1988a; Schöner *et al.*, 1992). La première est que l'information comportementale affecte pleinement la dynamique du système, que ce soit qualitativement ou quantitativement (i.e. en termes de stabilité), et pas seulement le pattern de coordination visé. Par exemple, Zanone et Kelso (1992) montre que l'apprentissage du pattern $\phi = 90^\circ$ permettait non seulement d'inscrire sur le long terme un troisième attracteur dans le paysage des attracteurs (soit un changement qualitatif capturé par une modification de la fonction de potentiel, à savoir $V(\phi) = -a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c \cos(4\phi)$), mais se traduisait également par une déstabilisation du pattern en anti-phase. Bien que toujours présent, cet attracteur présentait un niveau de stabilité plus faible¹⁵.

En second lieu, la dynamique intrinsèque du système persiste quand bien même une information comportementale y est intégrée. Ceci signifie que cette dynamique intrinsèque influence le degré de performance du pattern requis par l'information comportementale. Deux conditions sont alors possibles. Si le pattern requis correspond à un des attracteurs du système ($\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$), il y a alors une congruence des

¹⁴ On peut noter que l'influence d'une information comportementale caractérisant des exigences d'apprentissage peut également être appréhendée. Dans ce cas, la modélisation de la dynamique de l'apprentissage passe par une influence additive de trois composantes : la dynamique intrinsèque, l'influence liée une information comportementale environnementale et à une information comportementale mémorisée. Pour retrouver les développements mathématiques, le lecteur peut se référer à Schöner *et al.* (1992).

¹⁵ Il faut noter que ces résultats sont controversés. En effet, aucune étude n'a pu ou n'a observé cette déstabilisation du pattern en anti-phase après apprentissage. Par exemple, si Lee, Swinnen et Verchueren (1995) ou Fontaine, Lee et Swinnen (1997) montrent bien une augmentation de la variabilité du pattern en anti-phase en cours d'apprentissage, cet effet temporaire disparaît lors des tests de rétention.

effets de l'information comportementale et de la dynamique intrinsèque, se traduisant par une forte stabilité de l'attracteur et une faible déviation par rapport au pattern théorique. En revanche, lorsqu'il y a compétition entre les attracteurs du système et l'information comportementale, le comportement résultant a tendance fortement à s'écarter du pattern attendu (ψ) et à se réfugier sur l'attracteur le plus proche dans le paysage des attracteurs (Tuller & Kelso, 1989; Yamanishi *et al.*, 1980). Pour clarifier les choses, Zanone et Kelso (1992, p. 406) ont conceptualisé la première condition en tant que situation *de convergence*, alors que le second cas définit une situation *de compétition*.

En dernier lieu, quelle que soit la nature de la situation proposée, la dynamique comportementale dépend également de l'intensité (*strength*), c_{inf} de l'équation (19), de l'influence de l'information comportementale. Il est ainsi suggéré que plus cette force est importante, plus le niveau de modification de la dynamique du système (que cette modification soit positive ou négative en termes de stabilité) est important. On peut citer par exemple les travaux d'Amazeen, Amazeen, Treffner et Turvey (1997). En imposant à leurs sujets une attention toute particulière, soit sur leur main dominante soit sur l'autre main, lors de la réalisation d'une tâche de coordinations bimanuelles, ils montrent qu'une forte attention sur la main dominante permet de diminuer la variabilité du pattern en phase. Dans le cas de situations de compétition, le niveau de stabilité du pattern adopté dépend également de cette force. On peut faire les hypothèses que l'influence de l'information comportementale requiert un niveau minimal pour que le pattern exigé puisse être adopté et maintenu, si aucune transition de phase ne veut être observée. La dynamique de cette force semble donc jouer un rôle important dans la dynamique résultante.

La figure 3 tente de résumer les différentes conséquences possibles de l'information comportementale sur la dynamique de la tâche bimanuelle, en représentant le paysage des attracteurs (ϕ en fonction de $V(\phi)$), pour $\psi = 90^\circ$, $c_{inf} = 0$, $c_{inf} = 1$ et $c_{inf} = 10$, selon 2 fréquences d'oscillation, $b/a = 1$ et $b/a = 0.25$.

6- Conclusions

L'étude des coordinations motrices sous l'angle des modèles des systèmes dynamiques non linéaires permet de caractériser l'évolution qualitative de ces mêmes

coordinations, par la dynamique d'une variable qui gouverne *collectivement* l'ordre émergeant des interactions des contraintes subies par le système. Le meilleur exemple de telle modification qualitative est l'observation d'une transition de phase entre différents attracteurs du système sous l'effet de contrainte non spécifique, les paramètres de contrôle. En fonction des objectifs pratiques, la dynamique résultante peut alors être vue comme positive ou négative. Par exemple, Van Emmerik, Wagenaar et Wolters (1993) montrèrent que la variation de la vitesse de marche, induite par un tapis roulant, permettait des modifications du pattern de marche chez des patients atteints de la maladie de Parkinson. Les relations de phase entre les épaules et le pelvis présentaient alors des caractéristiques similaires au pattern de marche de sujets "normaux" (voir aussi Wagenaar & Van Emmerick, 1994).

En revanche, la disparition d'un attracteur, annoncée par une perte de stabilité et un niveau critique de fluctuations, ne pose-t-elle pas le réel problème de l'acquisition et surtout du contrôle des coordinations motrices? Dans quelles mesures les contraintes motivationnelles, émotionnelles ou encore énergétiques participent-elles à la réduction ou à l'accroissement de la stabilité des attracteurs spontanés et/ou à l'émergence de nouveaux états stables, qu'ils soient souhaités ou non?

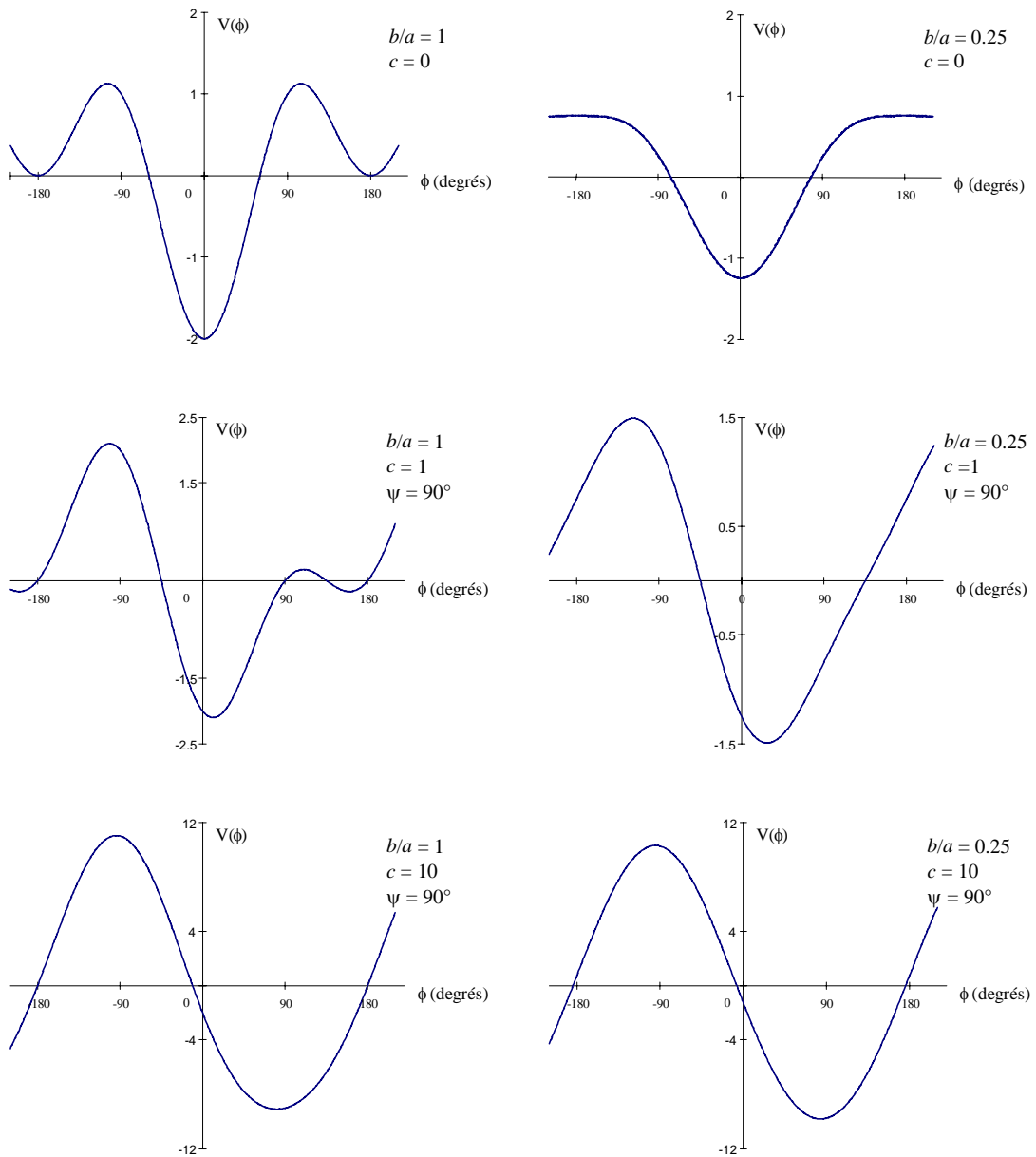


Figure 3 : Evolution du paysage des attracteurs selon 3 valeurs théoriques de c_{inf} ($= 0, 1$ et 10Hz) marquant l'importance relative de l'information comportementale ($\psi = 90^\circ$) sur la dynamique des coordinations bimanuelles. Deux fréquences, caractérisées par le rapport b/a , sont également envisagées : les graphiques de droite représentent l'évolution du potentiel selon les 3 valeurs de c_{inf} pour une faible fréquence ($b/a = 1$), alors que les graphiques de droite caractérisent la même évolution pour une fréquence importante ($b/a = 0.25$).

Quand bien même l'apprentissage d'une coordination non présente à l'origine dans la dynamique du système est possible (Fontaine *et al.*, 1997; Zanone & Kelso, 1992), la dynamique de cette compétition ne peut-elle pas être affectée (positivement ou négativement) par ce type de contraintes? En effet, si rôle de la contrainte liée aux intentions du sujet sur la dynamique du système a reçu quelques validations expérimentales (e.g., Carson *et al.*, 1994; Scholz & Kelso, 1990), le rôle de contraintes telles que *l'effort* (Humphreys & Revelle, 1984; Sanders, 1983), les dimensions *cognitives* et *somatiques* de *l'anxiété* ou encore le *stress* (e.g., Jones & Hardy, 1989; Martens, Vealey & Burton, 1990) a été encore très peu exploré sous l'angle qualitatif des coordinations motrices complexes.

Dans cette perspective, plusieurs objectifs de travail se sont alors dégagés :

- Le but de la première partie de notre travail est d'étudier l'influence d'une contrainte intentionnelle sur la dynamique de la tâche bimanuelle, en manipulant tout particulièrement et directement l'intensité de *l'effort* investi par les sujets. Dans un second temps, nous nous efforcerons de rendre compte des effets de cette contrainte et de la pertinence de leur modélisation, tant à un niveau mathématique qu'à un niveau pratique.
- La seconde partie de notre travail a pour but d'observer une éventuelle dégradation de la stabilité des attracteurs ou des phénomènes de transition de phase entre les différentes coordinations du système considéré, sous l'effet d'une *activation physiologique* induite par un exercice physique
- La dernière partie tente d'appréhender la dynamique de coordinations multi-articulaires à partir de la manipulation d'une situation *stressante*. Le but est de rendre compte de la complexité du système et de proposer de nouvelles perspectives quant à l'influence interactive de ces contraintes motivationnelles, émotionnelles et énergétiques sur les coordinations motrices.

Partie expérimentale

1- Influence des intentions sur le phénomène de transition de phase dans la tâche de coordinations bimanuelles

1- 1 Introduction

L'objectif de cette présente étude est de montrer l'influence de *la fixation de buts* (ou *goal setting*) sur la transition de phase du pattern en anti-phase vers le pattern en phase, observée dans une tâche de coordination bimanuelle, lorsque la fréquence d'oscillation atteint une valeur critique. Issues d'études menées dans les domaines organisationnels et industriels (Locke, 1968), de nombreuses recherches portant sur la réalisation de tâches motrices ont démontré les effets de l'assignation de buts sur l'amélioration de la performance (e.g., Locke *et al.*, 1981; Morrison & Weldon, 1990; Terborg, 1976; Tubbs, 1986; Weinberg, Fowler, Jackson, Bagnall & Bruya, 1991; Wright & Kacmar, 1995).

Par exemple, Smith et Lee (1992) montraient clairement que l'assignation de buts améliorait la performance motrice. La tâche motrice, inédite pour tous les participants, consistait à faire passer un ballon de basket d'une main à l'autre en le faisant rouler le long des bras en passant par la poitrine. Un contact constant du ballon sur le corps au cours de l'essai était le critère de réussite de la tâche motrice proposée. Les sujets étaient divisés en trois groupes, selon le type d'instructions reçues. Les sujets du premier groupe devaient déclarer publiquement le nombre d'essais réussis qu'il pensait réaliser avant la réalisation des 10 essais expérimentaux. Le second groupe était constitué de sujets qui s'auto-assignaient un objectif bien précis sans le déclarer. Les sujets restants ne recevaient aucune instruction précise, ayant juste le même temps de pratique. Les résultats indiquaient que tous les sujets pour qui une fixation de buts était exigée présentaient un indice de réussite significativement plus important que celui des sujets sans objectif précis.

Mais on doit également relever que certains travaux n'ont pas pu mettre de telles différences entre des sujets placés sous la condition " faites de votre mieux " (*do your best*) et la condition de buts quantitativement précis. Des analyses post-expérimentales ont permis d'avancer l'hypothèse selon laquelle les sujets qui réalisaient par exemple

une tâche de redressement (Weinberg, Bruya, Jackson & Garland, 1987) ou une tâche de tir au basket (Weinberg *et al.*, 1991) sans a priori d'objectifs précis se fixaient spontanément des buts quantitatifs.

Cependant, au travers des divers exemples cités, il est important de noter que la plupart des résultats relatant de l'influence d'une fixation intentionnelle de buts à atteindre sur la performance motrice ne sont évalués qu'en termes de taux de réussite ou d'échec ou bien encore d'amélioration ou diminution de performance dans des tâches type résolution de problèmes, anagrammes ou jeux vidéos (Colvin & Jacobs, 1993; Wright & Kacmar, 1995). Ceci permet de rendre compte au mieux de l'influence des processus intentionnels ou cognitifs *contraignant*¹⁷ la tâche, mais ne permet pas d'aborder le rôle des intentions ou de la fixation de but sur la dimension qualitative des actions et des synergies motrices impliquées.

Pour ce faire, la théorie dynamique des modifications comportementales se propose d'analyser cette contrainte "fixation de buts" en tant qu'information comportementale (Schöner & Kelso, 1988a). L'objectif d'une action motrice, conceptualisé en tant qu'*information intentionnelle* (ψ_{int}) permet alors de définir la perturbation de la dynamique du paramètre d'ordre, que ψ_{int} occasionne. Cette information intentionnelle a pour vertu d'attirer le pattern comportemental vers le pattern intentionnellement visé. Comme nous avons pu le voir, son influence se traduit mathématiquement par l'ajout d'un troisième terme cosinus dans la fonction de potentiel (équation 4) dont la dérivée traduit la dynamique spontanée de la tâche bimanuelle (Schöner & Kelso, 1988a) :

$$\dot{\phi} = \frac{dV(-a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c_{int} \cos(\phi - \psi_{int}))}{d\phi} + \sqrt{Q}\xi_t \quad (24)$$

où c_{int} mesure la force de l'influence de l'information intentionnelle sur la dynamique du système. Dans ce cas précis, l'absence d'information comportementale perceptive ou mémorisée est théoriquement supposée. Une des hypothèses principales émanant de ce modèle est l'influence des intentions sur la stabilité des attracteurs intrinsèques au système. En d'autres termes, en situations de convergence (i.e. ψ_{int} correspond à un des

¹⁷ A prendre dans le sens dynamique, à savoir réduisant l'ensemble des solutions possibles du système.

deux attracteurs du système, $\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$), l'intention modifie la force d'attraction de ces attracteurs. Ceci se traduirait par une diminution relative de leur niveau de fluctuations. Une seconde hypothèse est également émise et attendue : plus la composante intensive de cette intention est conséquente, plus cette diminution est importante (cf. point 5-2, p. 48). Ainsi dans un protocole d'incrémentation continue de la fréquence d'oscillation, l'apparition de la transition de phase de l'attracteur 180° vers le pattern en phase est attendue plus tardive lorsque les sujets sont placés préalablement sous consignes intentionnelles.

Par exemple, Scholz et Kelso (1990) montraient que le maintien intentionnel du pattern en anti-phase au-delà de la fréquence critique du sujet était possible. Après avoir déterminé la fréquence critique (F_c) des sujets selon un protocole d'incrémentation de 0.25Hz de la fréquence d'oscillation tous les dix cycles de mouvements (fréquence de départ 1.25Hz) (voir par exemple Scholz et Kelso, 1989), 12 conditions expérimentales d'oscillations bimanuelles étaient testées. Les sujets débutaient leurs essais soit sur le mode en phase soit sur le mode en anti-phase (2×36 essais) selon 6 fréquences, constantes au cours d'un essai : $F_c - 0.75\text{Hz}$, $F_c - 0.5\text{Hz}$, $F_c - 0.25\text{Hz}$, F_c , $F_c + 0.25\text{Hz}$ et $F_c + 0.5\text{Hz}$. Après dix cycles de mouvements réalisés selon le pattern de départ exigé, un signal auditif indiquait au sujet de transiter intentionnellement sur l'autre pattern de coordination. Bien qu'une plus faible stabilité du pattern en anti-phase ait été constamment observée (évaluée par l'écart-type du paramètre d'ordre, ϕ , e.g., Kelso *et al.*, 1987; Schönner *et al.*, 1986), indiquant de l'influence de la dynamique intrinsèque du système sur la dynamique intentionnelle, leurs résultats indiquaient que tous les sujets étaient capables de transiter sur le pattern en anti-phase et de le maintenir, pour toutes les fréquences de mouvement proposées.

Un résultat similaire a également été démontré par Lee *et al.* (1996). Leurs sujets devaient également réaliser des mouvements d'oscillations bimanuelles, en phase ou en anti-phase, selon 5 fréquences de mouvement (1Hz, 1.5Hz, 2Hz, 2.5Hz et 3Hz). Deux groupes expérimentaux étaient alors différenciés selon la nature des instructions verbales reçues. Il était demandé au premier groupe “*Do not intervene*” de ne pas résister s'ils sentaient le pattern de départ “glisser doucement” vers un autre mode de coordination, et de réaliser alors le pattern qu'il leur semblait le plus confortable. Le second groupe “*Stay*” était placé sous une consigne intentionnelle. Ils devaient

maintenir le pattern de départ pendant toute la durée de l'essai et de le rétablir s'ils semblaient leur "échapper". De plus, tout au long de l'expérimentation, de nombreux encouragements extérieurs leur rappelaient ces exigences de maintien intentionnel. Leurs résultats montraient clairement que les sujets du groupe "Do not intervene" présentaient des transitions de phase du pattern en anti-phase vers le pattern en phase pour les fréquences les plus importantes. En revanche, pour toutes les fréquences testées, les différentes valeurs de ϕ des sujets du groupe "Stay" se répartissaient selon une distribution unimodale, centrée autour de 180° .

La contrainte intentionnelle semble donc jouer un rôle important sur le contrôle moteur de la dynamique des coordinations bimanuelles. Mais quelques réserves peuvent être émises concernant ces divers résultats expérimentaux. La première relate du rôle de ψ_{int} sur la dynamique du système. Les résultats de Scholz et Kelso (1990) montrent que l'influence dynamique de ψ_{int} n'intervient qu'au moment où le signal auditif indique aux sujets de transiter intentionnellement sur le second attracteur du système. Or, ils n'observent aucune variation de la stabilité du pattern en phase pour toutes les fréquences, que ce soit avant ou après transition. En revanche, on peut relever des niveaux de fluctuations du pattern en anti-phase importants dès la troisième fréquence ($F_c - 0.25\text{HZ}$) lorsqu'ils sont évalués avant la transition exigée. De même, dès la quatrième fréquence (F_c), des niveaux similaires de variabilité ($\pm 25^\circ$) ont été mesurés pour ce même pattern lors des 20 cycles de mouvement qui ont suivi la transition du pattern en phase (cf. Scholz et Kelso, 1990, p. 116, figure 7). Une fois *présente* dans le système, l'information intentionnelle permet donc de *positionner* le pattern comportemental *autour* du pattern intentionnel, mais ne joue qu'un rôle tout relatif sur le contrôle des fluctuations subies par le système. La dimension intensive de cette action intentionnelle n'a pas été mise en évidence, à savoir le rôle du paramètre c_{int} .

Certes les résultats de Lee *et al.* (1996) semblent contrecarrer cette première réserve quant au rôle d'ensemble d'une contrainte intentionnelle sur la dynamique résultante de la tâche bimanuelle. Positionner ψ_{int} dès le début de la réalisation du pattern de coordination à maintenir semble induire une force intentionnelle suffisante pour satisfaire les exigences de la tâche. Mais la distinction de deux groupes de sujets sans évaluer au préalable leur fréquence critique de transition pose une seconde réserve d'ordre méthodologique. Les différentes fréquences de "travail" testées ne peuvent

correspondre à la même fréquence relative entre les sujets. Rien n'indique que les sujets du groupe "Stay" ne présentaient pas des fréquences critiques spontanées significativement plus importantes que les sujets du groupe "Do not intervene". Cette possibilité pourrait très bien expliquer la différence de résultats entre ces deux groupes. Ceci relativise *de facto* l'explication de l'influence du contrôle volontaire sur la dynamique du système, même s'il est vrai que les fréquences critiques spontanées généralement observées dans les tâches bimanuelles dépassent rarement 2.75Hz (voir par exemple Carson, Byblow, Abernethy & Summers, 1996).

Le but de cette première expérience est donc d'étudier la dynamique de la transition de phase sous l'influence d'une contrainte intentionnelle requise tout au long de la réalisation du pattern en anti-phase. Un protocole d'incrémentation continue de la fréquence d'oscillation a pour objet d'induire de légères fluctuations d'un cycle de mouvement sur le suivant. L'idée sous-jacente est d'évaluer le rôle implicite de la dimension intensive (i.e. c_{int}) d'une contrainte intentionnelle sur le processus de transition de phase de la tâche bimanuelle. En effet, par analogie aux travaux sur l'assignation de buts, en particulier ceux de Locke et Latham (1985), la contrainte intentionnelle permettrait (1) d'orienter, de positionner le système sur le pattern attendu, ψ_{int} , (2) de mobiliser un investissement intentionnel significatif, c_{int} , (3) d'inscrire cet investissement dans la durée, c'est-à-dire d'accroître la persévérance des sujets, et (4) de favoriser l'adoption de stratégies inédites de contrôle.

Selon cette logique, lorsqu'il est clairement exigé aux sujets de maintenir le plus activement possible le pattern en anti-phase et de résister le longtemps possible à la transition de phase vers le pattern en phase, on s'attend à ce que :

- Leurs fréquences critiques soient significativement plus importantes que dans une condition sans instruction particulière.
- La variabilité pré-transition de la phase relative soit plus faible que la variabilité mesurée dans la condition sans instruction, et ceci pour une même fréquence d'oscillation.

1- 2 Méthode

1-2-1 Sujets

Onze sujets volontaires, 9 garçons et 2 filles (âge moyen : 21.5 ± 2), étudiants de l'Université de Montpellier, ont participé à cette expérience. La tâche bimanuelle revêtait un caractère insolite pour chacun des sujets.

1-2-2 Appareillage

Le dispositif expérimental était composé de deux joysticks en bois d'une longueur de 15 centimètres, ne pouvant entrer en mouvement que dans le plan frontal du sujet. Les deux joysticks étaient vissés sur deux planches rectangulaires 20×10 , ce qui permettait de fixer ces planches sur une table selon un système adaptable aux caractéristiques physiques du sujet. Ainsi la distance entre les deux joysticks était réglée, à une largeur égale à celle des épaules du sujet. La hauteur de la table était également adaptée de manière à ce que les avant-bras du sujet, debout devant la table, soient horizontaux. Les mouvements angulaires des joysticks étaient enregistrés au moyen de potentiomètres situés au niveau de l'axe de chaque joystick, via un convertisseur A/D vers un processeur 486. La fréquence d'acquisition était de 100Hz. Enfin la fréquence d'oscillation était imposée aux sujets au moyen d'un métronome auditif, piloté informatiquement.

1-2-3 Procédure

Le protocole mis en place avait pour objet de déterminer la fréquence critique de transition (F_c) des sujets selon deux types de consignes, la consignes dite *avec objectif* et la consigne dite *sans objectif*, au cours d'une seule session expérimentale. Cette dernière se décomposait en trois temps.

1-2-3-1 Familiarisation avec la tâche bimanuelle

Sous forme d'instructions écrites, il était indiqué aux sujets qu'ils devaient réaliser des mouvements d'oscillations régulières et continues des deux joysticks selon deux modes de coordination, en phase et en anti-phase. Il leur était expliqué que le pattern en phase consistait en la synchronisation des mouvements des poignets, à savoir que les deux poignets sont tournés simultanément et alternativement vers l'intérieur et

l'extérieur par rapport à la position verticale de départ des deux joysticks. La coordination en anti-phase correspondait à des mouvements opposés des poignets : toujours par rapport à la position de départ du joystick, l'inclinaison du poignet droit vers l'intérieur devait coïncider à un mouvement vers l'extérieur du poignet gauche et réciproquement l'inclinaison du poignet droit vers l'extérieur à un mouvement vers l'intérieur du poignet gauche. Afin de les aider, des représentations graphiques leur étaient fournies. Pour finir, il leur était prescrit que leurs changements de direction de leurs mouvements devaient se réaliser sur le signal sonore.

Pour ce faire, à titre de familiarisation, les sujets réalisaient 4 essais en phase et 4 essais en anti-phase, d'une minute chacun, à fréquence d'oscillation d'1Hz (e.g., Kelso *et al.*, 1991). Les consignes précisaient (1) le maintien d'oscillations régulières et continues, en déplaçant les joysticks de 45° environ de part et d'autre de la position verticale de départ, (2) une synchronisation des changements de direction de leurs mouvements la plus précise possible avec le signal sonore et (3) que cette synchronisation devait toujours se réaliser au même "endroit" à l'intérieur d'un essai, à savoir soit sur la pronation ou supination des poignets pour le pattern en phase, soit sur la pronation du poignet droit et la supination du poignet gauche ou réciproquement pour le pattern en anti-phase.

1-2-3-2 Condition sans objectif

Après 5 minutes de repos, les sujets réalisaient successivement 6 essais au cours desquels la fréquence d'oscillation était régulièrement augmentée de 0.02Hz à chaque cycle de mouvement. Il était expliqué aux sujets qu'ils devaient démarrer l'essai sur le mode de coordination en anti-phase et que sous l'influence de l'augmentation de la fréquence, ils allaient avoir tendance à être attirés sur un autre mode de coordination. Il était demandé de ne pas résister à cette tendance et de se caler sur le mode de coordination qu'il leur semblait le plus confortable pour satisfaire les exigences de la fréquence imposée. L'essai était arrêté quelques secondes après l'apparition de la transition de phase.

1-2-3-3 Condition avec objectif

Après 10 minutes de récupération, les mêmes sujets réalisaient également 6 essais selon le même protocole d'incrémentation de la fréquence d'oscillation. Contrairement aux consignes précédentes, il leur était demandé de résister activement à la transition de phase en maintenant le plus longtemps possible le pattern en anti-phase. Pour ce faire, une concentration maximale leur était exigée.

1-2-3-4 Analyses des données et traitements statistiques

Les données de chaque essai se présentaient sous forme de 2 séries temporelles cycliques. Ces données ont été filtrées par une procédure de transformée de Fourier inverse, avec une fréquence de coupure de 3.00 Hz. Pour chaque cycle, les données de position (x) et de vitesse (dx/dt) ont été ré-étalonnées dans l'intervalle $[-1; 1]$ afin de déterminer les angles de phase des deux oscillateurs ($\theta = \arctg [dx/dt / x]$). La phase relative ϕ , définie comme la différence instantanée entre les phases, est calculée de la troisième seconde jusqu'au moment où le système est installé sur la pattern en phase, indiqué par le point d'inflexion de la série temporelle de ϕ (figure 4). La correspondance temporelle entre ce point d'inflexion et la fréquence d'oscillation permettait de déterminer la fréquence critique des sujets. De plus, un second calcul a été effectué afin de valider cette fréquence critique "graphique". En recherchant les maxima d'une série temporelle, l'inverse de la période entre 2 maxima permettait de calculer la fréquence de chaque cycle d'un oscillateur. La fréquence critique "graphique" était alors mise en parallèle avec les fréquences du cycle de mouvement correspondant temporellement. Dans le cas d'une grande divergence entre ces deux mesures, la fréquence critique a été évaluée par la seconde méthode. Trois cycles consécutifs de même fréquence étaient le critère retenu pour considérer cette fréquence comme critique. Cette variable dépendante était alors soumise à une ANOVA à mesures répétées 2 (conditions) \times 6 (essais).

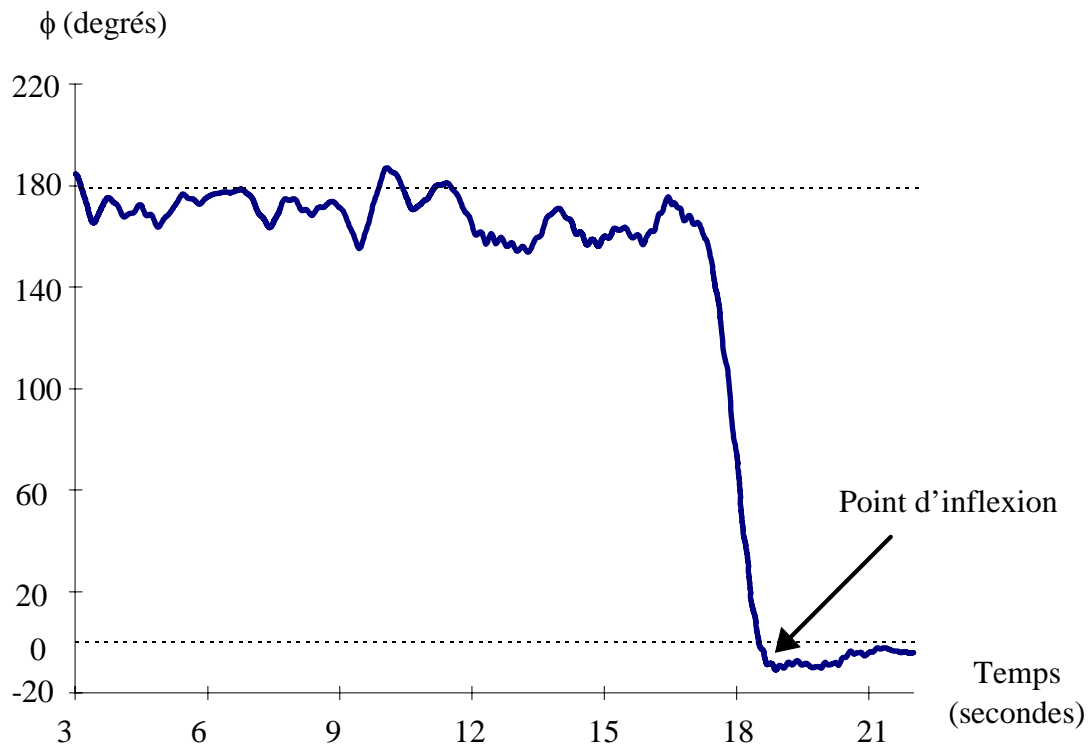


Figure 4 : Représentation de l'évolution de la phase relative en fonction du temps lors d'un essai où a été observée une transition de phase du pattern en anti-phase ($\phi = 180^\circ$) vers le pattern en phase ($\phi = 0^\circ$).

Il est important de relever le problème méthodologique sous-jacent au protocole adopté : le non contre-balancement de l'ordre de passation des conditions testées entre les sujets. Dans ce cadre, un effet d'apprentissage peut être observé, ce qui rendrait difficilement interprétable les résultats attendus, à savoir des fréquences critiques significativement plus importantes dans la condition avec intention. En conséquences, on vérifie notamment l'absence d'effet du facteur essai ou d'interaction incluant ce facteur. Ce pattern de résultat rejeterait une interprétation liée à un effet d'apprentissage, ce qui permettrait d'accréditer l'influence des intentions sur la dynamique du processus de transition de phase.

Comme Scholz et Kelso (1989) l'ont montré dans un protocole d'incrémentations de la fréquence d'oscillation, la transition de phase est annoncée par une augmentation de plus en plus importante des fluctuations (c'est-à-dire la mesure du ralentissement critique) à chaque fois que le pattern en anti-phase subit une perturbation induite par l'évolution du paramètre de contrôle (cf. point 3-2-2, p. 30). En proposant un protocole

d'incrémation cycle à cycle de la fréquence d'oscillation, notre objectif est d'étudier l'effet de la contrainte intentionnelle sur la dynamique de cette augmentation exponentielle des fluctuations du pattern en anti-phase. Certes, ces perturbations continues ne permettent pas de stabiliser le système, rendant difficile la détermination des diverses échelles temporelles sur lesquelles les différentes mesures de la stabilité du pattern en anti-phase sont possibles. Mais dans cette perspective, les perturbations liées à la fréquence étant vraisemblablement identiques dans les deux conditions expérimentales (avec ou sans objectif), l'analyse des différences des fluctuations à même correspondance temporelle entre ces deux conditions semble légitime.

Ainsi pour tester notre seconde hypothèse sur la différence du niveau de stabilité pré-transition du pattern en anti-phase, la variabilité de ϕ a été calculée sur plusieurs intervalles précédant la transition T : $I_1 = [T; T - 2s]$, $I_2 = [T - 2s; T - 3s]$, $I_3 = [T - 3s; T - 5s]$ et $I_4 = [T - 5s; T - 10s]$. Les estimations expérimentales et théoriques des temps de transition, le temps de transition $\tau_{\text{switch}} \cong 2 - 2.5$ secondes, ont motivé le choix des deux premiers intervalles (Schöner *et al.*, 1986; Scholz *et al.*, 1987; cf. aussi point 4-2-2-3, p. 36). Deux traitements ont été alors réalisés. Le premier traitement utilisait pour variable dépendante la variabilité de ϕ calculée sur les 4 intervalles à fréquence identique pour tous les essais d'un même sujet. Pour ce faire, quelle que soit la condition, on recherchait l'essai pour lequel la fréquence critique la plus faible a été observée. Cette fréquence devenait alors la référence de la détermination de la variabilité de ϕ pour les 11 essais restants. On réalisait alors une ANOVA à mesures répétées 2 (conditions) \times 6 (essais) \times 4 (intervalles).

Pour le second traitement, la variabilité de ϕ constituait également notre variable dépendante. Elle a été évaluée sur les 4 intervalles, mais cette fois à fréquence relative. Pour chaque essai, la détermination de la fréquence critique servait de référence de calcul des intervalles. De la même façon, une ANOVA à mesures répétées 2 (conditions) \times 6 (essais) \times 4 (intervalles) a été réalisée.

Pour chaque analyse, le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$ et des tests post-hoc de type Tukey HSD ont été réalisés le cas échéant.

1- 3 Résultats

1-3-1 Effet de la condition sur la fréquence critique

L'analyse de variance révèle un effet principal du facteur condition ($F_{1,10} = 88.076$, $p < 0.001$). La moyenne des fréquences critiques observées dans la condition sans objectif (2.11Hz) est significativement inférieure à celle calculée dans la condition avec objectif (2.54Hz). Aucun effet du facteur essai n'est observé (figure 5).

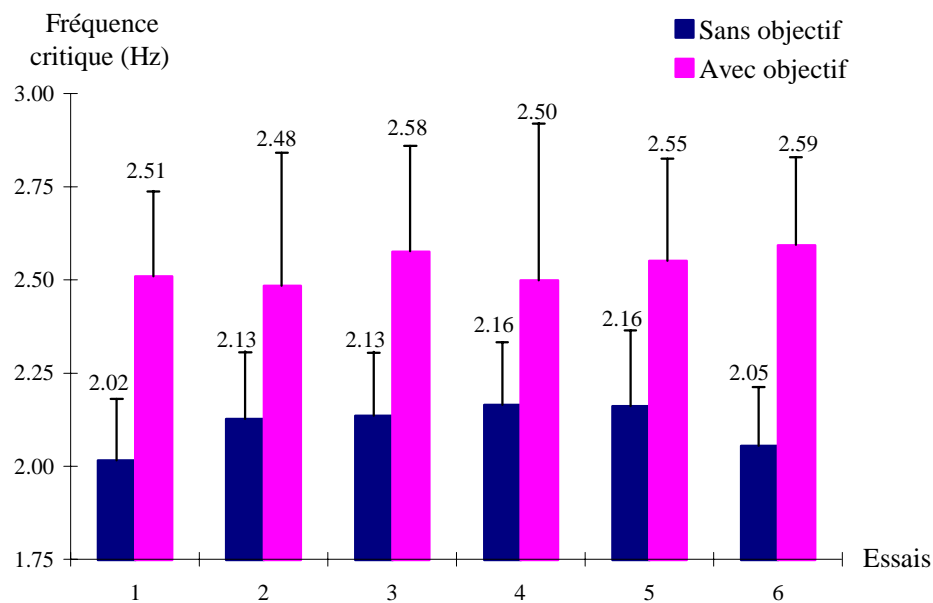


Figure 5 : Représentation de la moyenne de la fréquence critique de tous les sujets en fonction de la condition (sans objectif ou avec objectif) selon le rang d'essai.

1-3-2 Effet de la condition sur la variabilité pré-transition du pattern 180°

1-3-2-1 A fréquence identique

L'ANOVA indique des effets principaux du facteur condition ($F_{1,10} = 25.565$, $p < 0.001$) et du facteur intervalle ($F_{3,30} = 3.755$, $p < 0.05$), avec une interaction condition \times intervalle ($F_{3,30} = 17.148$, $p < 0.001$). Ces effets montrent d'une manière générale que, pour une même fréquence d'oscillation, la variabilité du pattern en anti-phase est plus importante dans la condition sans objectif, quel que soit l'intervalle considéré (figure 6). En effet, les tests post-hoc localisent une différence significative entre les deux

conditions à chaque intervalle (p minimum < 0.01), ainsi qu'entre I_4 et I_3 ($p < 0.05$), I_2 ($p < 0.001$), I_1 ($p < 0.001$) et entre I_3 et I_1 ($p < 0.05$) dans la condition sans objectif.

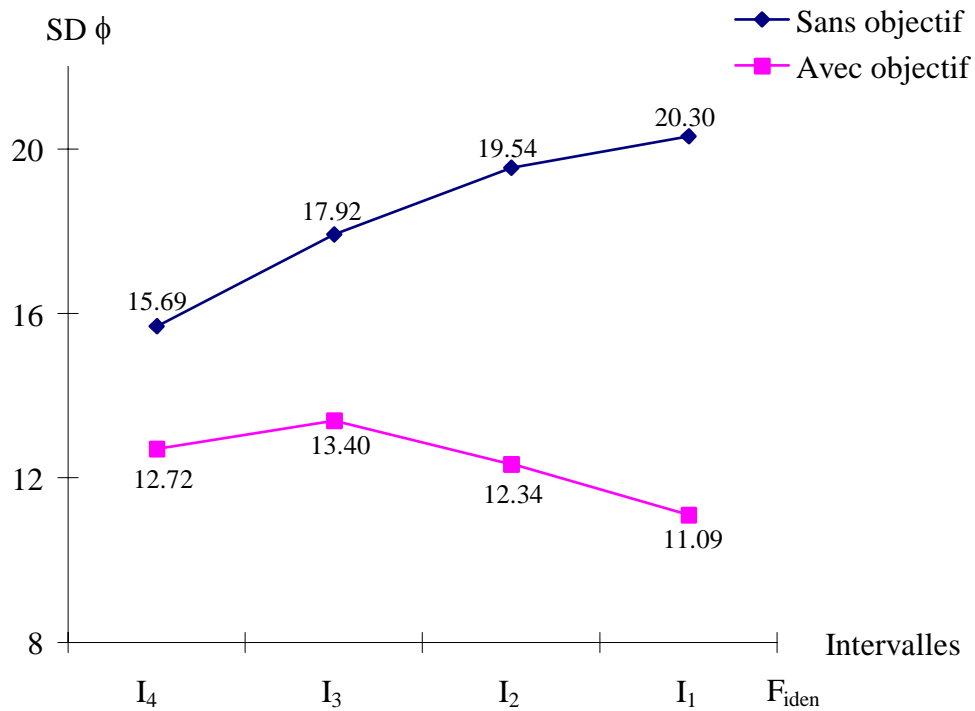


Figure 6 : Evolution de la variabilité du pattern en anti-phase déterminée à fréquence identique (F_{iden}) des 12 essais, pour chaque intervalle ($I_4 = [F_{iden} - 5s; F_{iden} - 10s]$; $I_3 = [F_{iden} - 3s; F_{iden} - 5s]$; $I_2 = [F_{iden} - 2s; F_{iden} - 3s]$; $I_1 = [F_{iden}; F_{iden} - 2s]$) et en fonction des deux conditions testées, avec ou sans objectif.

1-3-2-2 A fréquence relative

Les résultats de l'analyse de variance indiquent des effets principaux du facteur session ($F_{1,10} = 6.8$, $p < 0.05$), du facteur intervalle ($F_{3,30} = 280.113$, $p < 0.001$), et une interaction session \times intervalle ($F_{3,30} = 28.416$, $p < 0.001$). Bien que la variabilité du pattern en anti-phase ait été calculée sur les 4 intervalles précédant à chaque fois une transition de phase, les tests post-hoc révèlent que cette variabilité est significativement supérieure dans la condition sans objectif, et ceci pour chaque intervalle de mesure (p minimum $p < 0.01$) (figure 7).

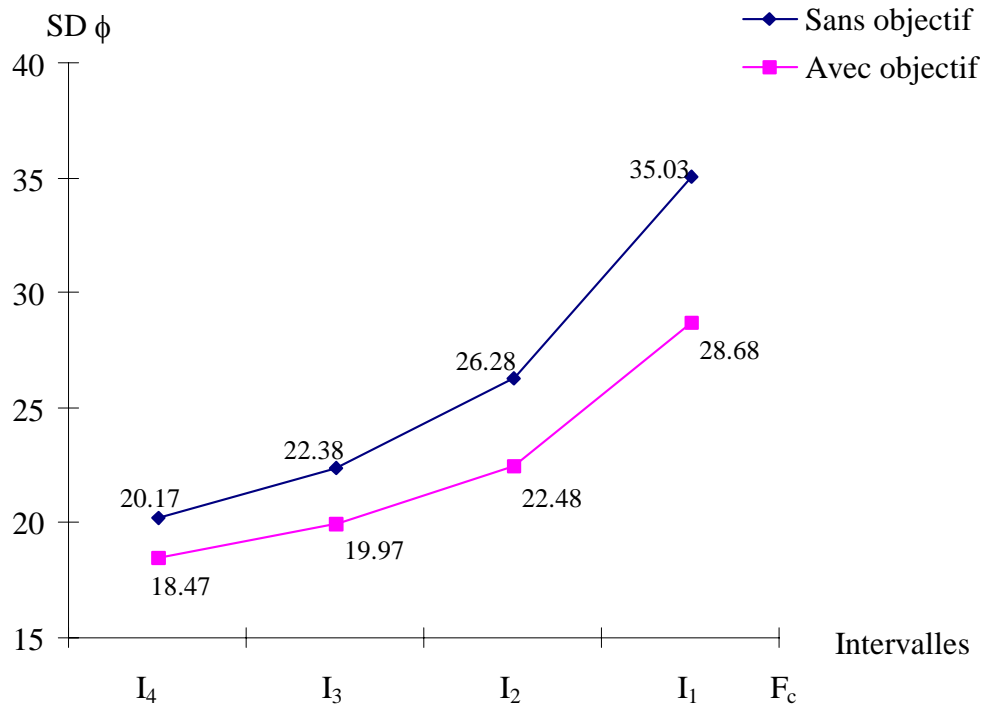


Figure 7 : Evolution de la variabilité du pattern en anti-phase déterminée à chaque fréquence critique (F_c) sur les 4 intervalles pré-transition ($I_4 = [F_c - 5s; F_c - 10s]$; $I_3 = [F_c - 3s; F_c - 5s]$; $I_2 = [F_c - 2s; F_c - 3s]$; $I_1 = [F_c; F_c - 2s]$), en fonction des deux conditions testées, avec ou sans objectif.

1- 4 Discussion

1-4-1 Aspects méthodologiques

Le protocole adopté avait pour but de répondre aux réserves méthodologiques issues des travaux de Scholz et Kelso (1990) et Lee *et al.* (1996). En effet, il nous a paru plus opportun et pertinent d'étudier l'effet d'une contrainte intentionnelle dans son ensemble, en considérant ses deux composantes, comme le prédit l'équation 24 (Schöner et Kelso, 1988a). S'il est courant, dans le domaine de la psychologie cognitive, de distinguer d'une part la composante directionnelle (i.e. la nature du but comportemental à atteindre, ici ψ_{int}), et d'autre part la composante intensive et quantitative de cette intention, conceptualisée comme la force de l'intention (c_{int}), les travaux sur l'assignation de buts montrent clairement l'influence mutuelle de ces deux composantes. Par exemple, Locke et Latham (1985) montrent que tant que le but assigné, même difficile, reste réalisable pour le sujet, les effets du goal-setting sur la

performance persistent. Ceci rejoint l'idée émise par Kukla (1972) qui postule que le niveau d'investissement intentionnel du sujet (c_{int}), ou *l'effort* (Humphreys & Revelle, 1984), est modulé par son estimation de la difficulté du but qui lui est assigné. Ceci débouche sur une relation positivement linéaire entre l'estimation de la difficulté du but et l'effort investi. Mais cette relation serait bornée par un maximum subjectif, au-delà duquel le niveau estimé de difficulté du but à atteindre est tellement important, que l'investissement intentionnel du sujet retombe à des valeurs insignifiantes.

Suivant cette logique, induire une contrainte intentionnelle directement et préalablement à la réalisation de la tâche bimanuelle nous a permis de dépasser le rôle d'*attirance* et de *positionnement* du comportement moteur de la composante directionnelle sur la dynamique du système (Carson *et al.*, 1994, Carson *et al.*, 1996; Scholz et Kelso, 1990). En effet, le modèle prédit qu'une apparition plus tardive de la transition de phase ne peut qu'être observée que si le niveau de stabilité du pattern en anti-phase est renforcé et/ou maintenu à son niveau « intrinsèque » pendant la durée pré-transitionnelle. Or ceci semble possible si l'investissement intentionnel est significatif, ce que démontrent implicitement Lee *et al.* (1996).

Un autre problème méthodologique qui aurait pu émerger de ce protocole est l'effet d'ordre des conditions non contrebalancées entre les sujets. La motivation première était d'éviter le biais de l'auto-assignation spontanée de buts de la part des sujets (Weinberg *et al.*, 1991). Sans contrainte intentionnelle spécifiquement imposée, les patterns de résultats des sujets auraient pu alors être identiques dans les deux conditions. Puisque les transitions de phase observées dans la condition avec objectif sont significativement plus tardives que celles survenues dans la condition sans objectif, l'ordre de passation des conditions induit naturellement une explication potentielle liée à l'effet d'apprentissage. Mais cette hypothèse ne peut être retenue. En effet, aucune différence de fréquence critique entre les essais n'est indiquée dans les analyses statistiques, quelle que soit la condition testée.

1-4-2 Interprétation des résultats

Les résultats montrent clairement qu'une information intentionnelle contraint la dynamique intrinsèque de la tâche bimanuelle. Conformément à notre première hypothèse, les fréquences critiques, valeurs du paramètre de contrôle indicatives de

l'occurrence d'une transition de phase du pattern en anti-phase vers le pattern en phase, sont nettement plus importantes dès lors qu'il est explicitement demandé aux sujets de résister intentionnellement à cette transition de phase. Ceci confirme les résultats relevés dans la littérature portant sur l'effet du goal-setting sur la performance motrice (Boyce, 1994; Garland, 1984). Mais l'étude et la modélisation (équation 24) de cette technique dans le cadre des théories dynamiques du contrôle moteur (Kelso *et al.*, 1988; Schöner & Kelso, 1988a) permettent réellement d'appréhender l'effet d'une assignation d'un pattern de coordination à réaliser sur les propriétés qualitatives du comportement. Si nous ne pouvons pas affirmer que la transition de phase disparaît sous l'influence d'une information intentionnelle lors d'un protocole d'incrémentation continue de la fréquence d'oscillation¹⁷, nos résultats indiquent qu'une contrainte intentionnelle module *la dynamique* de cette modification qualitative du comportement.

Ces transitions de phase tardives semblent s'expliquer par une modulation du niveau de fluctuations du pattern en anti-phase. Les résultats issus de l'analyse de la variabilité pré-transition du pattern en anti-phase à fréquence critique relative montrent que ces fluctuations sont significativement plus importantes dans la condition sans objectif, quel que soit l'intervalle considéré. Pourtant, quand bien même ces mesures d'instabilité se sont réalisées à des fréquences différentes, elles correspondent toujours à des intervalles précédant une transition de phase.

Si on observe bien une augmentation progressive des fluctuations critiques de la phase relative à l'approche des transitions de phase dans les deux conditions testées (Kelso & Scholz, 1985; Kelso *et al.*, 1986), force est de constater que l'instabilité pré-transition du pattern en anti-phase est significativement moins importante dans la condition avec objectif, quel que soit l'intervalle considéré. Non seulement les fréquences critiques relevées dans cette condition sont plus importantes, mais le niveau des fluctuations critiques, annonciatrices de la transition de phase, est également plus faible. Deux hypothèses peuvent alors être avancées dans l'interprétation de ce pattern de résultats.

¹⁷ Ce qui est contraire aux résultats de Lee *et al.* (1996) qui démontrent " que les sujets sont non seulement capables de retarder la transition de phase, mais également d'y résister entièrement " (p. 106). Mais leur travail n'impliquait aucun protocole d'incrémentation de la fréquence d'oscillation, donc aucune perturbation à laquelle le système devait s'accommoder.

Dans la condition sans objectif dans laquelle il était demandé de pas résister à la transition de phase, les transitions de phase peuvent être occasionnées par un changement volontaire de pattern à réaliser de la part des sujets désirant se positionner sur un pattern plus confortable. En effet, la supposition d'une activation ponctuelle d'une contrainte intentionnelle ψ_{int} est envisageable à l'approche de la transition de phase. En d'autres termes, il y aurait la contribution d'une information intentionnelle $\psi_{\text{int}} = 0^\circ$, aussi minime et temporaire que serait son influence vis-à-vis de la dynamique intrinsèque du système (diminution du rapport b/a , Haken *et al.*, 1985; Schöner *et al.*, 1986). Selon cette première hypothèse, les sujets préféreraient positionner leur comportement sur le pattern en phase afin de satisfaire les exigences de fréquence.

Dans la condition avec objectif, les mêmes sujets n'adopteraient pas la même stratégie de contrôle (4^{ème} proposition de Locke & Latham, 1985), ce qui expliquerait les fluctuations critiques plus faibles à l'approche de la transition de phase. Sur toute la durée de l'essai précédant la transition de phase, la dynamique du système serait constamment influencée par la dynamique de l'information intentionnelle. Cette dernière aurait pour vertu de préserver un potentiel d'attraction du pattern en anti-phase, dont la profondeur (i.e. son niveau de stabilité) dépendrait d'une part du niveau d'investissement intentionnel (c_{int}) du sujet, et d'autre part de la dynamique de cet investissement (2^{ème} et 3^{ème} proposition de Locke & Latham, 1985, confirmées par Locke, 1991; Wright, 1991). Il n'y aurait pas de modification qualitative de l'information intentionnelle, mais une diminution progressive de l'influence de l'investissement intentionnel sur le contrôle des perturbations continues (liées à l'incrémentation de la fréquence) du système. A un niveau critique de c_{int} , la transition de phase surviendrait.

L'hypothèse d'un rôle prédominant de l'investissement intentionnel ou de l'effort sur la dynamique de la tâche bimanuelle, et en particulier sur l'apparition différée de la transition de phase, est confirmée par l'analyse du niveau de stabilité pré-transition du pattern en anti-phase à fréquence identique pour tous les essais. En effet, les résultats indiquent que le niveau de variabilité du pattern en anti-phase reste constant sous la condition avec objectif, mais que cette variabilité tend à augmenter au fil des intervalles considérés sous la condition sans objectif. Cette différence ne peut être expliquée par l'influence de la composante directionnelle de l'information

intentionnelle ψ_{int} : dans les deux conditions , le système est placé sur le pattern en anti-phase. Ceci met en exergue l'influence de l'investissement intentionnel du sujet sur le niveau de stabilité du pattern en anti-phase. Comme le prédit le modèle (équation 24), ceci se traduit par un renforcement du potentiel d'attraction du pattern en anti-phase, ce qui retarde la *probabilité* de passage du système vers le pattern en phase (Schöner *et al.*, 1986). L'augmentation progressive du temps de relaxation local dans la condition sans objectif atteste également du rôle de l'effort sur le contrôle des coordinations motrices.

1- 5 Conclusion

En démontrant qu'une contrainte intentionnelle permet de retarder la transition de phase traditionnellement observée dans la tâche bimanuelle (Kelso, 1984; Kelso *et al.*, 1988; 1993), l'objectif de cette expérimentation était de redéfinir les effets du goal-setting sur la dimension qualitative des coordinations motrices. Les résultats montrent que l'assignation de but, capturée par une information intentionnelle dans la fonction de potentiel, permet non seulement d'attirer, de positionner le comportement sur le pattern exigé (Scholz & Kelso, 1990; Serrien & Swinnen, 1999), mais également d'induire un niveau d'effort significatif de modifications quantitatives des patterns de coordination. Dans un protocole d'incrémentation continue de la fréquence d'oscillation, la contrainte intentionnelle influence (1) la dynamique des modifications qualitatives du comportement, en retardant la transition de phase et (2) le niveau de stabilité des attracteurs, ce qui retarde l'influence des propriétés stochastiques du système sur la transition de phase.

En conséquence, ce qui semble prédominant sur la dynamique intentionnelle des coordinations bimanuelles est l'influence de la force de l'intention investie par les sujets. Comme le montraient Lee *et al.* (1996), en condition de réalisation non perturbée de la tâche bimanuelle, cette dimension intensive des intentions aurait pour rôle de stabiliser les deux attracteurs spontanés du système, même à hautes fréquences d'oscillation. Mais plusieurs questions restaient à éclaircir à ce niveau : y-a-t-il une influence différenciée de cet investissement intentionnel dans les situations de convergence et de compétition? Qu'en est-il de sa dynamique? Son influence est-elle dégressive avec le temps, s'inscrit-elle à long terme dans la dynamique du système? C'est dans cet esprit que nous avons envisagé la manipulation systématique de cette

force de l'intention (c_{int}) afin de réellement rendre compte de ces effets, tant au niveau expérimental que théorique.

2- Influence de la force de l'intention sur le niveau de fluctuations des patterns spontanés de la tâche de coordination bimanuelle

2-1 Introduction

La dynamique intentionnelle d'un pattern de coordination serait sous la dépendance d'une part de la dimension directionnelle des intentions, à savoir le pattern comportemental à atteindre, et d'autre part de leur dimension intensive, c'est-à-dire du niveau d'investissement intentionnel du sujet. En effet, l'intégration et l'étude du rôle de la fixation de buts sur la dynamique des coordinations bimanuelles montraient une occurrence différée de la transition de phase entre les deux attracteurs du système. Ce phénomène s'expliquait principalement par une diminution du niveau de fluctuations pré-transitionnelles du pattern en anti-phase lorsqu'il était explicitement demandé aux sujets de maintenir ce pattern le plus longtemps possible. Comme le prévoit le modèle de Schöner et Kelso (1988a) (équation 24), cette diminution de la variabilité du pattern en anti-phase serait gouvernée par un investissement intentionnel significatif. Selon cette logique, l'objectif de cette étude est d'étudier spécifiquement l'influence de la force de cette intention sur la stabilité des patterns de coordination de la tâche bimanuelle.

D'une façon plus générique, le goal-setting modulerait l'intensité de la motivation du sujet. Ce concept hypothétique de la motivation permet de " décrire les différences dans la direction et l'intensité du comportement " (Humphreys & Revelle, 1984, p. 157), ce qui exprimerait selon les théories dynamiques les différences qualitatives et quantitatives des coordinations motrices. L'état motivationnel du sujet résulterait de l'interaction entre les exigences individuelles et les contraintes de la tâche.

Issu des propositions des modèles cognitivo-énergétiques (Gaillard, 1993; Humphreys & Revelle, 1984; Sanders, 1983), il est suggéré que la qualité des réponses motrices, évaluée généralement par la vitesse de traitement de l'information, soit sous la dépendance de l'état énergétique du système, déterminé par son niveau d'*activation*. Suite aux travaux princeps de Yerkes et Dodson (1908), il a été fréquemment soutenu qu'il existerait pour un processus du traitement de l'information donné un niveau optimum d'activation, pour lequel la performance observée était optimale. L'activation renvoie dans ces modèles à un niveau énergétique basique, déterminé par l'état

physiologique du système (Lacey, 1967), et sensible à certain nombre de facteurs contextuels, tels que la privation de sommeil (Wilkinson, 1964), la température ambiante (Provins, Glencross & Cooper, 1973), le risque perçu (Mace, 1979) ou encore les enjeux de la situation (Martens, Vealey & Burton, 1990).

La plupart de ces modèles cognitivo-énergétiques postulent également l'existence d'un mécanisme volontaire de modulation de l'état énergétique de base : généralement dénommé *effort*, ce mécanisme sur la base d'une évaluation des contraintes de la situation et de l'état du système, remplit une double fonction. La première est de réguler le niveau d'activation lorsque celui-ci est en dehors de l'optimum requis. Boutcher et Zinsser (1990) notaient par exemple que des golfeurs étaient capables de réduire délibérément leur niveau d'activation juste avant de tenter un coup difficile. Cet effet, mis en évidence au travers d'une diminution de la fréquence cardiaque, était d'autant plus net que les joueurs sont experts. En second lieu, le mécanisme d'effort améliore directement l'efficacité de certains processus du système de traitement de l'information (Gaillard, 1993; Sanders, 1983).

2-1-1 L'effort : l'allocation et la disponibilité des ressources

D'une manière générale, l'effort exprime l'état motivationnel représentant le degré d'implication du sujet dans la réalisation d'une tâche. Il peut facilement être induit par des instructions expérimentales ou diverses formes d'encouragements. Comme le définissent Humphreys et Revelle (1984), l'effort (*on-task effort*) correspond à l'*allocation* des ressources du système (p. 158). En effet, le sujet disposerait de multiples ressources énergétiques qu'il pourrait allouer en fonction des contraintes du système (e.g., Navon & Gopher, 1979). Cette dépense " *d'énergie mentale* " ou d'effort (Temprado *et al.*, 1999) correspond à deux concepts, d'une part l'allocation des ressources, et d'autre part leur disponibilité. Le premier exprime le niveau de ressources que le sujet investit sur une des composantes de la tâche proposée. Le second concept représenterait un état motivationnel susceptible de créer des ressources additionnelles, ou du moins de les rendre plus disponibles, sans pour autant que cela se traduise par une redistribution de ces ressources jusqu'alors " consommées " par une autre dimension du système (Humphreys & Revelle, 1984, p. 159).

Cette seconde interprétation de l'état motivationnel du sujet a été largement démontrée par Temprado *et al.* (1999). En étudiant le bilan énergétique impliqué dans l'activité coordinatrice du système nerveux (e.g., Fuchs & Kelso, 1994; Kelso, 1997) par l'intermédiaire du paradigme de la double tâche (tâche bimanuelle et tâche de temps de réaction), leurs résultats confirmaient l'effet de la disponibilité des ressources sur la stabilité des attracteurs. Plus spécifiquement, il a été observé que le niveau de fluctuations du pattern en anti-phase diminuait significativement lorsque la priorité attentionnelle était placée sur la réalisation de la tâche bimanuelle (*DUBI*) par rapport aux deux autres priorités attentionnelles testées, soit sur la tâche de temps de réaction (*DURT*), soit une attention partagée (*shared attention*) entre les deux tâches.

La manipulation de cette contrainte attentionnelle aurait pour rôle principal de rendre *disponible* des ressources énergétiques additionnelles du sujet. Cette influence sur la dynamique du système peut ainsi être modélisable au travers de la dimension intensive d'une information attentionnelle, ψ_{att} ¹⁸. Si les résultats de Temprado *et al.* (1999) montrent clairement l'effet d'une force attentionnelle (c_{att})¹⁹ plus importante sur la stabilité des coordinations motrices selon les conditions expérimentales, une différence fondamentale doit être retenue quant à l'analyse de l'effet d'une *allocation* différente de ressources sur une même et unique information comportementale.

Un investissement " motivationnel " plus important de la part du sujet (i.e. une augmentation volontaire de la force attentionnelle) est-il réellement la cause de la diminution des fluctuations du système? Cette diminution n'est-elle pas simplement induite par une modification directionnelle de cette contrainte attentionnelle? En effet, la dynamique résultante de la double tâche dépend de la nature de la composante directionnelle de l'information attentionnelle, qui est par définition différente selon les trois conditions testées. De façon très vulgaire (cf. note 18), on peut envisager une information attentionnelle $\psi_{att} = \phi$ dans la condition *DUBI*, $\psi_{att} = TR$ dans la condition

¹⁸ Bien qu'envisageable, cette modélisation est très certainement très complexe tant les " performances " des deux tâches impliquées dans cette étude ne s'expriment pas dans la même métrique. Toujours est-il que l'influence respective de l'une sur l'autre ne peut être ignorée comme le démontrent les résultats expérimentaux.

¹⁹ Ce paramètre correspond à la définition de l'effort selon Kahneman (1973), à savoir la dimension intensive et volontaire de l'attention.

DURT, et $\psi_{att} = \phi$ et $\psi_{att} = TR$ dans la condition d'attention partagée. Ainsi une priorité attentionnelle, mesurant l'influence des intentions du sujet, rend compte du rôle de la disponibilité des ressources sur la dimension quantitative des coordinations motrices, mais ne permet pas d'appréhender l'effet de l'allocation des ces ressources, autre composante de l'effort (Humphreys & Revelle, 1984).

2-1-2 Effet hypothétique de l'effort, l'allocation des ressources

Pour ce faire, on se doit de conserver en premier lieu la même composante directionnelle de l'information intentionnelle. Mais s'il on sait que cette composante directionnelle de l'intention est susceptible soit de générer une transition entre les deux patterns de la dynamique du système (Scholz & Kelso, 1990), ou encore de résister à une transition de phase (Lee *et al.*, 1996), aucune recherche n'a encore tenté d'étudier les effets des intentions similaires du point de vue de la composante directionnelle, mais différentes en terme d'intensité. Dans cette perspective, dans l'équation représentative de cette dynamique :

$$\dot{\phi} = \frac{dV(-a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c_{int} \cos(\phi - \psi_{int}))}{d\phi} + \sqrt{Q}\xi_t \quad (25)$$

cela revient à manipuler directement la grandeur du paramètre c_{int} qui renvoie à la composante intensive de l'information intentionnelle ψ_{int} . Pour reprendre les concepts que nous avons employés précédemment, cette force de l'intention rendrait compte du degré d'investissement des ressources de la part du sujet (i.e. l'allocation des ressources ou l'effort). Ce modèle prévoit que le niveau de stabilité des patterns comportementaux dépend d'une part de leurs propriétés intrinsèques et d'autre part de l'influence de cette information intentionnelle (Schöner & Kelso, 1988a, 1988c).

Par exemple, Scholz et Kelso (1990) ont parfaitement démontré cette double dépendance sur le processus de transition de phase intentionnelle entre les deux attracteurs du système de coordination bimanuelle. Non seulement, les sujets étaient capables de transiter volontairement vers l'autre pattern (i.e. du pattern en phase vers le pattern en anti-phase ou vice et versa), même à fréquences sur-critiques, mais que le temps de transition (*switching time*) dépendait de la stabilité intrinsèque relative du pattern de départ et du pattern de destination (voir aussi Serrien & Swinnen, 1999). De

la même façon, Lee *et al.* (1996) ont montré que les sujets étaient capables de maintenir le pattern en anti-phase pour des hautes fréquences, pour peu qu'ils demandaient clairement aux sujets de résister délibérément à la transition.

Comme le suggèrent Scholz et Kelso (1990), un investissement intentionnel important (c_{int}) prédirait un maintien d'un pattern de coordination en compétition avec la dynamique intrinsèque : “ Thus, one would predict that increased effort should be required to adopt and maintain this [anti-phase] coordinatrice pattern at high movement frequencies, as is generally reported by subjects ” (p. 105). Ainsi la force de l'intention semble jouer un rôle important dans la dynamique des coordinations bimanuelles, tant au niveau qualitatif qu'au niveau quantitatif. Cette présente étude a donc pour objectif de manipuler directement et uniquement le niveau d'effort des sujets, ce qu'aucune étude n'a encore expérimentée. On s'est contenté généralement de comparer un groupe sans contrainte intentionnelle à un groupe recevant une information intentionnelle précise (voir par exemple Lee *et al.*, 1996).

On se propose de différencier deux groupes de sujets, recevant une même information intentionnelle (ψ_{int}), en fonction de la force de l'intention (c_{int}) supposée plus importante dans un groupe que dans l'autre. La tâche proposée consistait en la réalisation et le maintien de l'un des patterns intrinsèquement stables de la tâche bimanuelle, à des fréquences d'oscillation plus ou moins élevées. Ces dernières permettaient de distinguer des situations de convergence et des situations de compétition. Dans ce cadre on fait les hypothèses que :

- quelles que soient la force de l'intention et la nature de la situation, les sujets parviendront à maintenir le pattern de coordination requis.
- la variabilité des patterns de coordination sera plus faible pour les sujets ayant une force d'intention plus importante.

2-2 Méthode

2-2-1 Sujets

Huit sujets masculins (âge moyen : 22.5 ± 2.6), étudiants de l'Université de Montpellier, ont participé volontairement à cette expérimentation. Aucun des sujets n'avait eu d'expérience préalable dans la réalisation de la tâche bimanuelle.

2-2-2 Appareillage

La tâche consistait en la réalisation de mouvements continus selon le mode de coordination en phase ou en anti-phase. Le dispositif expérimental utilisé restait exactement identique à l'étude précédente (cf. partie expérimentale, point 1-2-2, p. 58). Rappelons juste que la position des joysticks était adaptée aux caractéristiques de chaque sujet et que la fréquence d'acquisition des données angulaires des joysticks était de 100Hz.

2-2-3 Procédure

L'expérience était constituée de cinq sessions, séparées par au moins un jour de repos.

2-2-3-1 Première session

A titre de familiarisation avec la tâche bimanuelle, les sujets réalisaient tout d'abord 4 essais en phase et 4 essais en anti-phase d'une minute chacun, à fréquence d'oscillation d'1Hz. Les sujets recevaient les mêmes consignes que lors de la première étude (cf. partie expérimentale, point 1-2-3-1, p. 59). A la suite de ces 8 essais, et afin de déterminer la fréquence critique (F_c) des sujets, 10 essais étaient administrés selon un protocole d'incrémentations de la fréquence d'oscillation par paliers de 4 secondes (fréquence d'entrée : 1.25Hz, pas : 0.25Hz; Kelso & Scholz, 1985; Scholz & Kelso, 1990), les sujets débutant sur le mode en anti-phase.

Il était demandé aux sujets de ne pas résister lors de l'émergence de la transition de phase²⁰. La fréquence critique correspondait au palier au cours duquel était observé

²⁰ Les consignes précises se formulaient comme suit : " Sous l'augmentation progressive de la fréquence d'oscillation, vous allez avoir tendance à être attiré sur un autre mode de coordination. Ne résistez pas à

le passage du pattern en anti-phase sur le pattern phase. La fréquence critique retenue pour chaque sujet était la médiane de l'échantillon des 10 fréquences de transition observées. L'évaluation de cette F_c a permis de déterminer 5 fréquences d'oscillation de "travail" pour les sessions expérimentales ultérieures : $F_1 = F_c - 0.5\text{Hz}$, $F_2 = F_c - 0.25\text{Hz}$, $F_3 = F_c$, $F_4 = F_c + 0.25\text{Hz}$ et $F_5 = F_c + 0.5\text{Hz}$. Ceci permettait non seulement de proposer des fréquences de travail relatives à chacun des sujets (contrairement à Lee *et al.*, 1996), mais également de différencier des situations de convergence et des situations de compétitions (Zanone & Kelso, 1992).

2-2-3-2 Sessions expérimentales

Chacune des 4 sessions suivantes comprenait 2 essais en phase et 2 essais en anti-phase pour chaque fréquence de travail. La durée de l'essai était de 30 secondes et la fréquence d'oscillation restait constante. Donc 20 essais étaient réalisés au cours de chaque session, dont l'ordre était randomisé. Les sujets ne recevaient aucune information préalable sur la fréquence proposée. Seul le mode de coordination à adopter leur était indiqué.

Les sujets étaient aléatoirement répartis en deux groupes expérimentaux (G1 et G2), différenciés en fonction de deux types d'instructions au cours des différentes sessions. Le premier type, appelé *instruction de base* (I_b), demandait aux sujets de "maintenir le pattern de coordination exigé en réalisant des oscillations les plus stables et régulières possibles, tout en suivant la fréquence proposée". Pour la seconde *instruction, dite augmentée* (I_a), il leur était demandé en plus de cette exigence de maintien de "faire le maximum d'effort et de rester concentré le plus longtemps possible afin de s'approcher le plus possible de l'indice idéal de précision". Cet indice était présenté aux sujets comme représentant le degré de synchronisation entre les deux oscillateurs, un indice égal à 1 correspondant à une synchronisation idéale. Il est important de noter que les valeurs annoncées au terme de chaque essai ne constituaient que des données fictives, destinées à entretenir la force de l'intention. Cet indice ne renseignait aucunement les sujets sur leur performance et ne constituait pas un feed-

cette tendance et calez-vous sur le mode de coordination qui vous semble le plus confortable pour pouvoir suivre la fréquence imposée".

back, mais bien un artifice expérimental permettant de maintenir l'impact motivationnel de l'instruction augmentée d'un essai sur l'autre (e.g., Locke *et al.*, 1968).

L'hypothèse sous-tendant ce protocole est que la force intentionnelle générée par l'instruction augmentée est supérieure à la force générée par l'intention de base. Le tableau 1 représente le plan pour les 4 sessions expérimentales en fonction de la nature des instructions reçues. Les deux groupes reçoivent l'instruction de base lors des sessions 2 et 4, et l'instruction augmentée lors de la session 5. Lors de la session 3, le groupe 1 reçoit l'instruction de base, et le groupe 2 l'instruction augmentée. L'objectif de ce protocole était d'analyser les effets à court terme (session 3) et à plus long terme (session 4 et 5), de l'administration de l'instruction augmentée.

	Groupe 1	Groupe 2
Session 2	Intention de base	
Session 3	Intention de base	Intention augmentée
Session 4	Intention de base	
Session 5	Intention augmentée	

Tableau 1 : Plan expérimental

2-2-3-3 Analyses des données et traitements statistiques

La phase relative, ϕ , a été déterminée à partir de la même analyse des données temporelles enregistrées et des mêmes calculs que ceux effectués lors de la première étude (cf. partie expérimentale, point 1-2-3-4, p. 60). Elle a été calculée sur 25 secondes (de la 3^{ème} à la 28^{ème} seconde de l'essai).

Afin de valider la méthode et de rendre compte du *réel* effet de la force de l'intention sur la stabilité des patterns comportementaux, on a tout d'abord vérifié que les sujets étaient bien capables de suivre les fréquences de travail imposées par le métronome. Pour cela on déterminait l'intervalle de confiance de la fréquence moyenne de chaque oscillateur (au seuil $p = 0.05$), et on contrôlait que la fréquence requise par le

métronome était incluse dans cet intervalle (test de la moyenne attendue)²¹. Dans un second temps, on a vérifié que les sujets étaient capables, quelle que soit la fréquence imposée, de maintenir le pattern requis. Pour ce faire, la moyenne de la phase relative a été soumise à une ANOVA à mesures répétées avec le groupe (×2) comme facteur inter-sujets, et la session (×4) et la fréquence (×5) comme facteurs intra-sujets, pour chacun des deux patterns. A ce niveau, on vérifiait notamment l'absence d'effet du facteur fréquence ou d'interaction incluant la fréquence.

Les tests des hypothèses reposent sur l'analyse de deux variables dépendantes : (1) la variabilité de phase relative ϕ ($SD\phi$) qui permet d'évaluer les différences de stabilité des patterns intentionnels selon le type d'instructions prescrites, et (2) la précision du pattern produit (i.e. son écart au pattern exigé), évaluée au travers de la valeur absolue de l'erreur constante (ACE) ($|\text{moyenne } \phi \text{ moins } 0 \text{ ou } 180^\circ|$; voir Fontaine *et al.*, 1997).

Ces variables ont d'abord été soumises à une ANOVA à mesures répétées 2 (groupes) × 4 (sessions) × 5 (fréquences), pour chacun des patterns de coordination testés. Puis des ANOVAs 2 (groupes) × 5 (fréquences) ont été réalisées pour chacune des 4 sessions expérimentales. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$ et les effets significatifs ont été analysés au moyen de tests post-hoc de type Tukey HSD.

2-3 Résultats

2-3-1 Fréquences critiques des sujets

²¹ On détermine les limites de confiance de la moyenne de toutes les fréquences correspondant à chaque cycle de mouvement de chaque oscillateur (joystick droit et gauche) (pour la détermination de l'échantillon de ces fréquences, cf. Partie expérimentale, point 1-2-3-4, p. 60). Le test de la moyenne attendue (μ) se traduit alors comme suit :

$$L_{\text{inf}} = m - t(\sigma/\sqrt{N}) < \mu > L_{\text{sup}} = m + t(\sigma/\sqrt{N})$$

où m et σ égalent respectivement la moyenne et l'écart-type de l'échantillon N des fréquences et t , le t de Student.

La moyenne des fréquences critiques spontanées de tous les sujets est de 2.125 Hz (± 0.23) avec une moyenne de 2.25 Hz (± 0.2) pour les sujets du groupe 1 et de 2 Hz (± 0.2) pour le groupe 2.

2-3-2 Fréquence attendue

Les résultats des tests de moyenne attendue n'indiquent aucune différence entre la fréquence des oscillations et la fréquence imposée, quelles que soient les sessions ou la nature des instructions intentionnelles. On peut de ce fait considérer que tous les sujets, tout au long de l'expérimentation et quelles que soient les instructions qu'ils aient reçues, ont bien respecté les différentes fréquences d'oscillation qui leur étaient imposées.

2-3-3 Moyenne de la phase relative

L'analyse de variance sur la phase relative moyenne ne révèle aucun effet du facteur fréquence d'oscillation, ni d'interaction incluant la fréquence. Ce résultat est essentiel en ce qui concerne les essais sur le mode de coordination en anti-phase, dans la mesure où il montre que quelles que soient la session ou la nature des instructions reçues, les sujets ont été capables de maintenir ce pattern lors des essais à fréquence critique et fréquences sur-critiques, c'est-à-dire de résister à la transition de phase.

2-3-4 Variabilité de la phase relative

2-3-4-1 Le pattern en phase

Toutes les analyses réalisées sur le pattern en phase, que ce soit pour la variabilité de ϕ ou l'erreur constante absolue, n'ont décelé aucun effet simple ou d'interaction significatif. En d'autres termes, le pattern en phase a toujours été réalisé avec une stabilité et une précision équivalente, quelles qu'aient été la session et la nature des instructions prescrites aux sujets (figure 8).

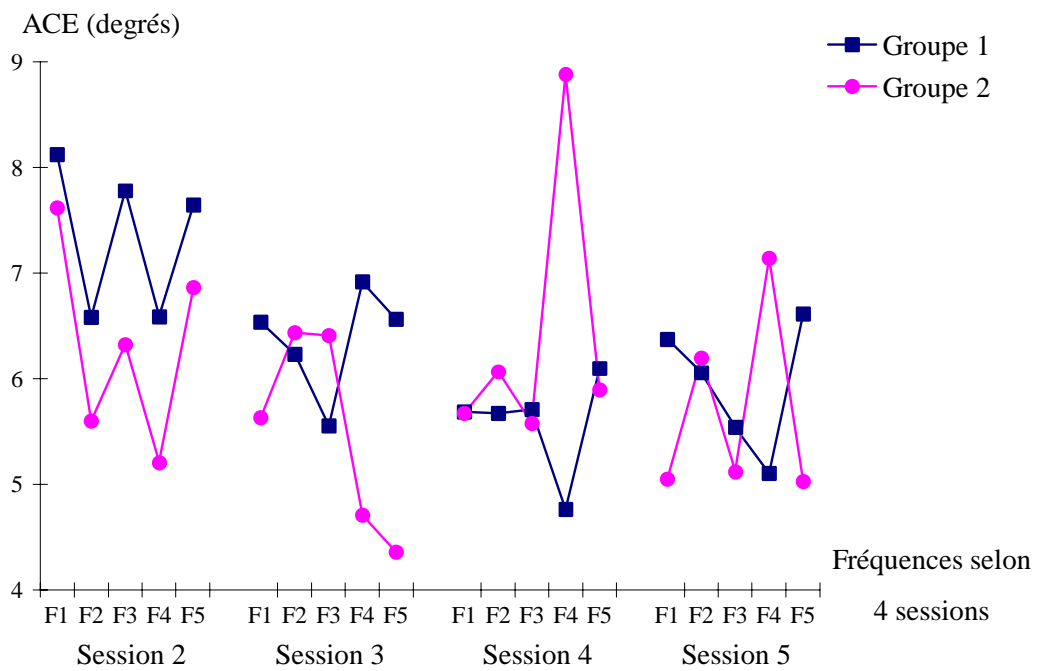
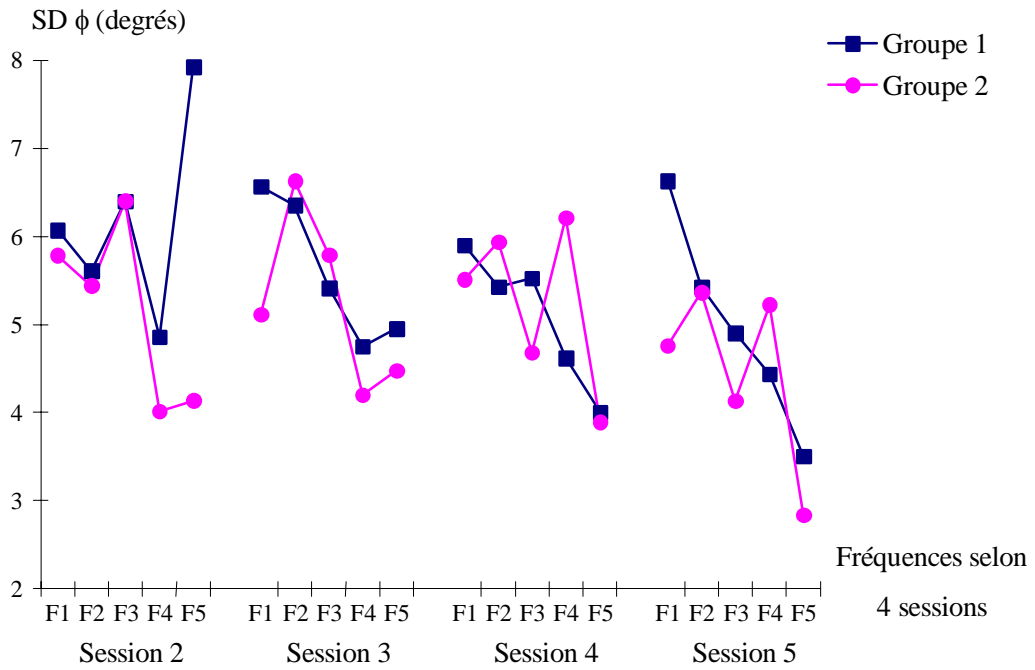


Figure 8 : Evolution de la variabilité (haut) et de la précision (bas) du pattern en phase selon la nature des instructions intentionnelles reçues par les 2 groupes au cours des 4 sessions expérimentales, pour les 5 fréquences testées ($F1 = F_c - 0.5\text{Hz}$; $F2 = F_c - 0.25\text{Hz}$; $F3 = F_c$; $F4 = F_c + 0.25\text{Hz}$; $F5 = F_c + 0.5\text{Hz}$).

2-3-4-2 Le pattern en anti-phase

L'ANOVA réalisée sur l'ensemble des 4 sessions indique des effets principaux du facteur session ($F_{3,18} = 7.431$, $p < 0.01$) et du facteur fréquence ($F_{4,24} = 5.433$, $p < 0.01$), avec une interaction session \times fréquence ($F_{12,72} = 4.235$, $p < 0.001$) : ces effets indiquent que d'une manière générale la variabilité augmente avec la fréquence, mais que cet effet tend à diminuer au fil des sessions (figure 9). Les ANOVAs par session permettent d'obtenir des résultats plus précis.

Pour la *session 2*, on n'obtient qu'un effet du facteur fréquence ($F_{4,24} = 5.49$, $p < 0.01$) : les tests post-hoc indiquent que tous groupes confondus, la variabilité de la phase relative est plus importante à la fréquence la plus élevée que dans toutes les autres conditions.

Lors de la *session 3*, on obtient un effet groupe ($F_{1,6} = 10.08$, $p < 0.05$), et une interaction groupe \times fréquence ($F_{4,24} = 3.98$, $p < 0.05$). Les tests post-hoc montrent que si l'on observe à nouveau, dans le groupe recevant l'instruction "I_b", un accroissement de la variabilité lors des essais à fréquence sur-critique (significatif pour les fréquences 4 et 5 ($p < 0.05$), par rapport aux trois autres fréquences), la variabilité n'évolue pas de manière significative entre les cinq conditions de fréquence pour le groupe recevant l'instruction "I_a".

L'ANOVA ne révèle aucun effet lors de la *session 4*, durant laquelle les deux groupes étaient placés sous l'instruction "I_b". Il en est de même pour la 5^{ème} et dernière *session*, dans laquelle les deux groupes avaient reçu l'instruction "I_a".

2-3-5 Erreur constante absolue de la phase relative

L'ANOVA portant sur la précision du pattern en anti-phase réalisé lors des 4 sessions révèle des effets similaires à ceux obtenus pour la variabilité : on observe un effet du facteur session ($F_{3,18} = 5.887$, $p < 0.01$) et du facteur fréquence ($F_{4,24} = 7.133$, $p < 0.001$), avec une interaction session \times fréquence ($F_{12,72} = 2.656$, $p < 0.01$). Les différentes comparaisons post-hoc montrent que l'augmentation de l'erreur constante absolue proportionnelle aux fréquences proposées tend à disparaître au fil des sessions (figure 9).

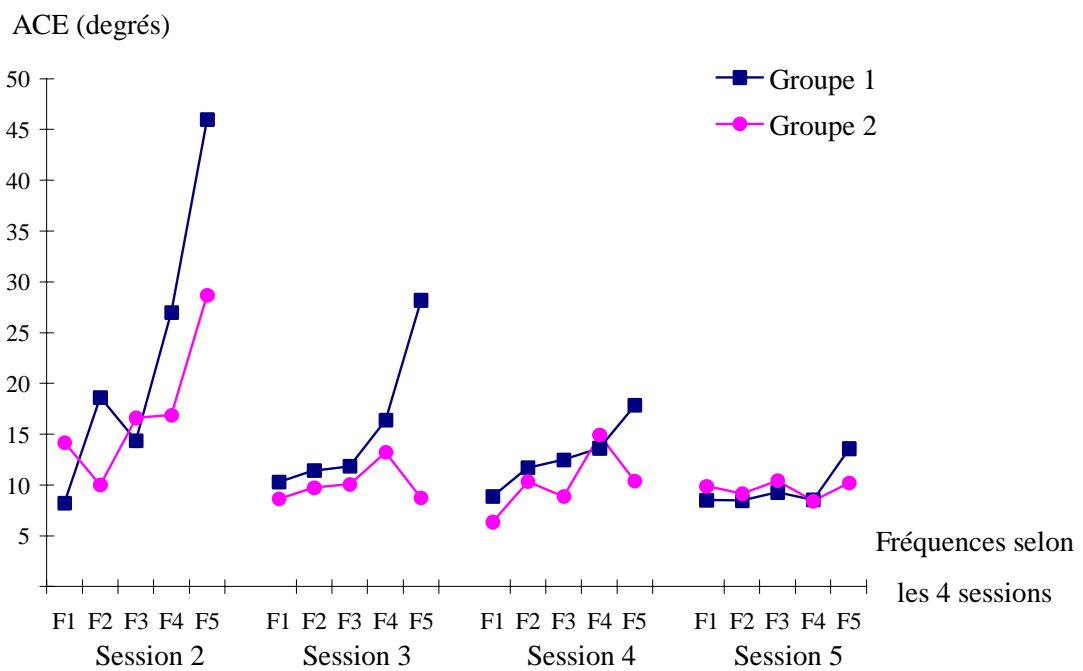
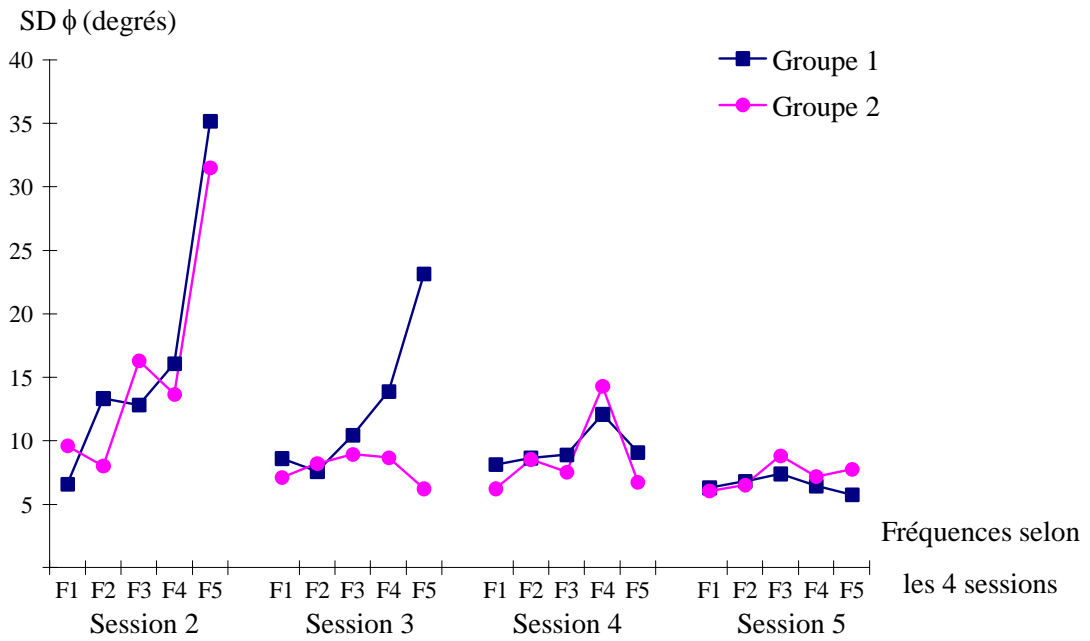


Figure 9 : Evolution de la variabilité (haut) et de la précision (bas) du pattern en anti-phase selon la nature des instructions intentionnelles reçues par les 2 groupes au cours des 4 sessions expérimentales, pour les 5 fréquences testées ($F1 = Fc - 0.5\text{Hz}$; $F2 = Fc - 0.25\text{Hz}$; $F3 = Fc$; $F4 = Fc + 0.25\text{Hz}$; $F5 = Fc + 0.5\text{Hz}$).

L'ANOVA réalisée sur la *session 2* révèle un effet principal du facteur fréquence ($F_{4,24} = 4.74$, $p < 0.01$), localisé par les tests post-hoc au niveau des essais à fréquence 5, pour laquelle la précision est significativement altérée par rapport aux essais réalisés aux autres fréquences, excepté pour la fréquence 4.

Lors de la *session 3*, on observe comme pour la variabilité un effet du facteur groupe ($F_{1,6} = 6.89$, $p < 0.05$) et une interaction groupe \times fréquence ($F_{4,24} = 2.9$, $p < 0.05$). Les tests post-hoc indiquent que pour le groupe placé sous instruction de base, la précision est plus faible lors des essais à fréquence 5 que lors des essais à fréquence 1, 2, et 3. En revanche, le facteur fréquence n'a aucun effet sur la précision en ce qui concerne le groupe sous instruction augmentée.

Pour la *session 4*, seul un effet du facteur fréquence est obtenu ($F_{4,24} = 2.97$, $p < 0.05$). Enfin aucun effet n'est enregistré lors de la *session 5*.

2-4 Discussion

Dans un certain nombre de recherches antérieures, il a été démontré qu'une information intentionnelle (ψ_{int} de l'équation 25) était susceptible de contraindre la dynamique intrinsèque de la tâche de coordination bimanuelle (Carson *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 1996; Scholz & Kelso, 1990). Bien qu'elle semble jouer un rôle important sur la dynamique du système, en attirant et positionnant le comportement sur le pattern visé, plusieurs éléments suggéraient l'influence de sa composante intensive, c'est-à-dire sa force (c_{int}). En particulier, la réalisation et le maintien du pattern en anti-phase à hautes fréquences d'oscillation ne peuvent uniquement s'expliquer par le rôle directionnel des intentions. Situé en théorie sur un repellant, un pattern en anti-phase en compétition avec la dynamique spontanée ne peut être maintenu sans une restauration de potentiel, qui permet de résister à la transition induite par le bruit (Schöner *et al.*, 1986). Selon le modèle, la force de l'intention ou l'effort serait responsable de cette fonction de stabilisation du pattern produit. Dans ce cadre, notre hypothèse principale était que plus le sujet s'investit intentionnellement dans la réalisation de la tâche, plus le pattern produit est stable.

2-4-1 Aspects méthodologiques

Comme le soulignent Humphreys et Revelle (1984), dans le cas de la réalisation d'une seule tâche, il est possible de concevoir l'investissement intentionnel du sujet en termes d'allocation de ressources (p. 159). L'étude de l'influence de cette dimension quantitative sur la dynamique de la tâche bimanuelle est alors permise à condition de conserver la même information intentionnelle. Marqueur de l'importance relative de cette dernière dans la détermination de la dynamique du système, l'effort doit nécessairement s'analyser pour une même dynamique " qualitative " du comportement. Pour cette raison, les comparaisons du niveau de stabilité inter-patterns semblaient peu appropriées, et ceci d'autant plus que la dynamique intentionnelle résultante est également influencée par les propriétés intrinsèques des deux attracteurs (Scholz & Kelso, 1990; Serrien & Swinnen, 1999).

Encore une fois, montrer une différence de stabilité d'un même pattern entre deux conditions totalement différentes (voir par exemple Lee *et al.*, 1996), ne permet pas de déterminer de l'influence prédominante d'une des deux composantes de l'information intentionnelle sur la dynamique du système. Supposons qu'en condition stable (i.e. fréquence constante au cours de l'essai) de réalisation " non intentionnelle " d'un pattern de coordination, et principalement à faibles fréquences, la dynamique de la phase relative puisse être gouvernée par l'équation 25, aussi minime serait le paramètre c_{int} . En conséquences, la modification du niveau de stabilité de ce pattern sous l'effet d'une instruction intentionnelle peut facilement se justifier par un investissement intentionnel plus important. Mais cela nécessite le contrôle méthodologique de tous les facteurs susceptibles de modifier les contraintes de la tâche.

A basses fréquences ($\cong 1\text{Hz}$), les résultats de Temprado *et al.* (1999) et Lee *et al.* (1996) diffèrent quant à l'effet de la contrainte intentionnelle sur le niveau de variabilité du pattern en anti-phase. Les premiers montrent une augmentation significative de la stabilité en condition de focalisation attentionnelle, ce que n'observent pas Lee *et al.* (1996). Cette différence, difficilement interprétable en termes de différence d'investissement intentionnel, peut trouver une autre justification. Cette diminution de la variabilité ne serait pas due à la consigne attentionnelle prescrite, mais à la disparition de la contrainte de distraction verbale présente dans la condition contrôle (Dornic, 1986; Dornic, Sarnecki, Larsson & Svensson, 1974).

De même, le choix et la détermination des fréquences d'oscillation sont importants dans l'évaluation des effets de la force de l'intention sur la dynamique des coordinations bimanuelles. Chaque condition de réalisation de la tâche doit être relative à la dynamique intrinsèque de chaque sujet. En ce sens, les différences de stabilité des patterns de coordination ne peuvent être dues à l'effet de la fréquence d'oscillation sur la dynamique de la phase relative. Non seulement cette précaution permet de définir la nature de la tâche réalisée, de convergence ou de compétition, par chaque sujet, mais de pouvoir appréhender les différences individuelles sur "la capacité à investir et maintenir des ressources intentionnelles" (Scholz & Kelso, 1990, p. 120).

En conservant la même information intentionnelle et manipulant des fréquences d'oscillation relatives à la dynamique intrinsèque de chaque sujet, le protocole adopté investissait réellement l'influence de la force de l'intention sur la dynamique intentionnelle. Il était alors proposé deux types de consignes intentionnelles supposées induire un investissement différent des ressources de la part des sujets. Or nos résultats valident la pertinence des consignes proposées dans l'étude du rôle de l'effort dans le contrôle moteur. Seule l'hypothèse d'une différence de capacité d'investissement de ressources des sujets pouvait poser problème dans l'affirmation d'une différence d'effort liée aux consignes. Mais comme nous l'indiquent les résultats de la stabilité du pattern en anti-phase lors de la session 5 (tous les sujets étant placés sous intention augmentée), cette hypothèse est difficilement envisageable dans la mesure où aucune différence entre les groupes n'a été observée.

2-4-2 Interprétation des résultats

Comme nous pouvions logiquement s'y attendre, nos sujets s'avèrent capables de réaliser intentionnellement le pattern en phase, quel que soit le niveau des fréquences imposées. Il est néanmoins intéressant de noter que contrairement à nos hypothèses, la manipulation de la force intentionnelle ne permet pas de renforcer la stabilité de ce pattern. En d'autres termes, la stabilité du pattern en phase apparaît indépendante de la force de l'intention.

Si l'on considère d'une manière générale que la stabilité d'un pattern est déterminée conjointement par la dynamique intrinsèque de ce pattern et par la contrainte intentionnelle installant le système à son niveau (Scholz & Kelso, 1990), il semble qu'en

ce qui concerne le pattern en phase ses propriétés intrinsèques soient prédominantes sur la dynamique résultante. Ce résultat suggère l'existence d'un “ *effet plancher* ”, c'est-à-dire un niveau de stabilité au-delà duquel aucun progrès délibéré ne pourrait être enregistré. Ceci peut rappeler, par analogie, la distinction opérée par Norman et Bobrow (1975), entre les processus limités par *les données* et les processus limités par *les ressources*, les seconds étant les seuls susceptibles de voir leur efficacité modulée par un investissement supplémentaire de ressources. De même, Dornic et Andersson (1980) ont proposé de distinguer entre les tâches limitées par *la difficulté*, et les tâches limitées par *l'effort* : ce n'est que dans le second cas qu'un investissement plus important du sujet peut déterminer un accroissement de la performance. Ceci ne peut évidemment constituer qu'une analogie, dans la mesure où il est difficilement soutenable que les réalisations des patterns en phase et en anti-phase soient sous-tendues par des processus qualitativement distincts.

L'effet observé constitue néanmoins une violation apparente du modèle de Schöner et Kelso (1988a), qui ne prévoit pas de limite à l'influence de l'information comportementale sur la dynamique du système, comme le suggèrent les simulations mathématiques. Notons néanmoins que cette analyse part du postulat que la force de l'intention a réellement été plus importante, lors des essais en phase, dans la condition "intention augmentée". Il n'est en fait pas évident que l'instruction intention augmentée induise de manière automatique un accroissement de la force de l'intention. En effet, comme nous l'avons déjà signalé, certains travaux, réalisés dans le domaine du goal-setting (e.g., Weinberg *et al.*, 1990; 1991), suggèrent que les sujets tendaient à redéfinir les buts qui leur étaient assignés (par exemple, des sujets placés dans une condition "faites de votre mieux" peuvent à l'insu de l'expérimentateur s'auto-assigner des buts quantitatifs très précis). Smith et Lee (1992) ont par exemple montré qu'en prenant en compte non pas les buts assignés par l'expérimentateur, mais les buts réellement suivis par les sujets, on obtenait une plus grande consistance dans les résultats expérimentaux.

L'investissement d'effort semble en fait avant tout déterminé par la perception de la difficulté de la tâche : selon Kukla (1972) un sujet investit peu d'effort s'il estime la tâche facile, et l'investissement croît proportionnellement avec la difficulté perçue. Ces propositions ayant récemment reçu des validations expérimentales convaincantes (e.g., Gendolla, 1999; Wright, Wadley, Pharr & Butler, 1994), nous pouvons de ce fait

avancer l'hypothèse selon laquelle une instruction telle que notre "intention augmentée" ne détermine un investissement supplémentaire d'effort que dans la mesure où la tâche est perçue comme suffisamment difficile pour le justifier.

Nos résultats indiquent que quelle que soit la nature des consignes proposées, les sujets sont capables de maintenir le pattern en anti-phase à des fréquences supérieures à leur fréquence spontanée de transition. En premier lieu, ceci confirme les résultats de Lee *et al.* (1996), et montre clairement qu'une information comportementale, dans toutes ces dimensions, est susceptible de moduler la dynamique intrinsèque du système, et de restaurer à haute fréquence un minimum dans la fonction de potentiel au niveau du pattern en anti-phase. Il peut alors être facilement soutenu que ce niveau de stabilité "augmentée" permet de résister aux fluctuations stochastiques présentes dans le système (cf. Schöner *et al.*, 1986).

En outre, nos résultats mettent en évidence un second point essentiel : la force de l'intention module la stabilité du pattern en anti-phase. Dans la condition "intention augmentée", nos sujets non seulement maintiennent le pattern en anti-phase aux fréquences sur-critiques, mais de plus conservent un niveau de variabilité similaire à celui observé aux fréquences sous-critiques. En revanche, dans la condition "intention de base", on observe malgré le maintien du pattern en anti-phase, un accroissement important des fluctuations aux fréquences sur-critiques, et ce d'autant plus que la fréquence est élevée.

Il est intéressant de noter que l'on n'observe de différences en termes de stabilité entre les deux conditions qu'au niveau des fréquences sur-critiques, c'est-à-dire en situations de compétition. Encore une fois, la consigne "intention augmentée" ne semble générer un investissement supplémentaire d'effort "utile" que si la difficulté de la tâche le justifie. Tant que le sujet est en situation de convergence (c'est-à-dire lorsque qu'il réalise le pattern en phase, ou le pattern en anti-phase aux fréquences sous-critiques), la stabilité de la coordination semble principalement déterminée par la dynamique intrinsèque du système. L'influence de l'information intentionnelle ne serait alors générée que par le rôle de sa composante directionnelle (ψ_{int}). Cette dernière servirait dans ce cas à positionner le paramètre d'ordre sur le pattern visé, pour lequel un potentiel d'attraction reste présent dans le paysage des attracteurs. Par contre, dans les

situations de compétition, la force de l'intention joue un rôle essentiel pour rendre disponible le pattern requis, en luttant contre la dynamique intrinsèque du système.

Nous obtenons des résultats parallèles en ce qui concerne la précision des patterns : l'instruction "intention augmentée" améliore la précision du pattern en anti-phase, c'est-à-dire sa convergence avec le pattern requis, mais cet effet n'apparaît qu'à fréquences sur-critiques. Outre qu'il confirme que l'investissement d'effort, même sous l'instruction "intention augmentée", n'intervient que lorsque la tâche est perçue comme suffisamment difficile, ce résultat montre que l'effort contraint la dynamique du système de manière simultanée sur les registres de la stabilité et de la précision.

A cet égard, on peut rappeler les travaux de Amazeen, Amazeen, Treffner et Turvey (1997) ou Swinnen, Jardin et Meulenbroek. (1996), qui mettent en évidence l'influence de l'attention sur la stabilité des coordinations motrices. Cette contrainte attentionnelle, renvoyant également à une dimension intensive du comportement, stabilise d'autant plus le pattern de coordination exigé qu'il était demandé aux sujets de porter leur attention sur leur main dominante. On peut noter que ces effets ont été observés sur des coordinations réalisées à des fréquences peu élevées, sous-critiques. Ceci constitue une première divergence avec nos résultats, dans la mesure où ce n'est qu'à hautes fréquences, et donc en situation de compétition, que nous observons un effet significatif de l'investissement d'effort. Par ailleurs, les expériences précédemment citées montrent que si les sujets présentent des coordinations plus stables lorsqu'ils portent leur attention sur leur main préférentielle, les patterns observés deviennent en revanche moins précis. Ces résultats divergents montrent que les distinctions classiquement réalisées entre attention, intention, et effort sont loin d'être triviales. L'analyse de leurs effets respectifs sur la dynamique de la phase relative dans les tâches de coordination bimanuelle révèle des influences différenciées, intervenant dans des conditions différentes.

Nos résultats suggèrent également que l'investissement d'effort n'a qu'un effet temporaire sur la stabilisation des patterns. En effet, les différences constatées entre les deux groupes lors de la réalisation du pattern en anti-phase lors de la session 3 disparaissent lors de la session 4, au cours de laquelle tous les sujets étaient placés sous "intention de base". Ceci laisse entendre que les sujets investissent de plus en plus

d'effort au fur et à mesure de l'expérimentation, lorsqu'ils sont confrontés aux fréquences les plus élevées, et ce, quelles que soient les instructions qu'ils reçoivent.

De même, lors de la session 5, alors que les deux groupes reçoivent l'instruction "intention augmentée", aucune différence n'est constatée entre les deux groupes à fréquence équivalente, ni en termes de stabilité, ni en termes de précision. De plus, les deux groupes produisent des coordinations similaires en termes de stabilité et de précision que celles réalisées par le groupe 2 lors de la session 3, quelle que soit la fréquence proposée. En d'autres termes, les sujets du groupe 2 ne semblent pas tirer de bénéfice à long terme de la pratique sous "intention augmentée", ni en terme de stabilisation des patterns lorsque l'on revient à la consigne "intention de base" (session 4), ni en terme de capacité à investir de l'effort sous la consigne "intention augmentée" (session 5). L'instruction "intention augmentée" ne semble en fait que rendre plus précoce (dès la session 3) cet investissement.

2-5 Conclusion

Cette étude démontre que la distinction classique entre la composante qualitative (ou directionnelle) et quantitative (ou intensive) de l'intention est essentielle dans la compréhension du contrôle des coordinations motrices. Nos résultats confirment que l'information comportementale permet d'orienter le comportement du système sur le pattern exigé, et de le maintenir sur toute la durée de l'essai. Mais le principal résultat à retenir concerne le rôle de l'allocation des ressources sur la dynamique des coordinations motrices. Lorsque l'on demande explicitement aux sujets de produire un effort important pour réaliser les coordinations requises, on obtient effectivement une meilleure stabilité du pattern, mais uniquement pour des situations en compétition avec la dynamique intrinsèque du système. L'effort jouerait donc un rôle important avant tout (1) lorsque l'on veut produire une coordination contrainte par des conditions extrêmes (par exemple par des fréquences sur-critiques), et/ou (2) lorsque l'on cherche à réaliser une coordination non naturelle, c'est-à-dire absente du répertoire intrinsèque du système.

D'une manière générale, les intentions et l'effort jouent un rôle significatif sur le comportement lorsque la probabilité de transition est intrinsèquement importante. Grâce aux intentions, un minimum persiste ou réapparaît dans la fonction de potentiel au

niveau du pattern requis. Dans les situations de compétition, le pattern requis est intrinsèquement instable, et un investissement d'effort conséquent est nécessaire pour le stabiliser. C'est notamment le cas lors des essais en anti-phase à fréquences sur-critiques. L'intention creuse un attracteur au niveau du pattern en anti-phase, et la profondeur de cet attracteur est proportionnelle à la force de l'intention. Toute transition vers le pattern en phase devient improbable tant que l'effet de cet effort persiste (Scholz et Kelso, 1990). Il nous est alors apparu intéressant de valider cette hypothèse, par la détermination de la valeur du paramètre c_{int} rendant compte de l'investissement des ressources du sujet. Une telle analyse permettrait de passer du niveau des instructions à celui des intentions réellement suivies par les sujets. L'hypothèse d'un accroissement de la valeur du paramètre c_{int} sous "intention augmentée" lors des essais en anti-phase à fréquences sur-critiques, rendrait compte quantitativement de l'effet de l'effort sur la comportement du système.

3- Détermination du niveau d'investissement intentionnel au cours de la réalisation du pattern en anti-phase à hautes fréquences d'oscillation

3-1 Introduction

En s'appuyant sur la modélisation des contraintes cognitives (Swinnen *et al.*, 1994) en tant qu'information comportementale, un certain nombre d'études montrent comment les intentions, l'attention, l'effort ou encore l'état émotionnel du sujet interfèrent avec la dynamique intrinsèque d'une tâche de coordination (Amazeen *et al.*, 1997; Carson *et al.*, 1996; Court, Bennett, Davids & Williams, 1998; Fontaine *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 1996; Scholz & Kelso, 1990; Wuyts, Summers, Carson, Byblow & Semjen, 1996; Zanone & Kelso, 1992).

Pour notre part, dans l'étude précédente, nous avons démontré qu'une forte mobilisation d'effort, en tant qu'allocation de ressources (Humphreys & Revelle, 1984), permettait de résister à la transition de phase entre les deux attracteurs de la tâche bimanuelle, et de conserver et renforcer le potentiel d'attraction du pattern en anti-phase à fréquences sur-critiques d'oscillation. Ceci se traduisait par une meilleure stabilité du pattern en anti-phase de la part des sujets pour lesquels un important investissement intentionnel était expérimentalement prescrit. Mais contrairement à nos attentes et aux prédictions mathématiques de Schöner et Kelso (1988a) (équation 25, p. 74), ces résultats n'ont été observés que lors de la réalisation de situations de compétition.

Mais la différence des forces intentionnelles induites par les instructions (i.e. "intention de base" et "intention augmenté") est purement théorique, bien que confirmée par les mesures de variabilité de la phase relative. Dans cette expérimentation, il était seulement possible de comparer deux conditions intentionnelles différentes à l'intérieur et entre les sessions expérimentales. Cette comparaison implique la propriété de dépendance des conditions initiales liée à tout système dynamique non linéaire (voir par exemple Bergé *et al.*, 1997, pp. 60-67; Ruelle, 1991, chap. 7). De plus, le caractère stochastique des fluctuations (Schöner *et al.*, 1986) influence aussi la partie déterministe du système de coordinations bimanuelles. Ceci n'est pas sans conséquence sur la détermination des paramètres a , b , et c_{int} nécessaire pour valider une différence quantitative du niveau d'investissement intentionnel des sujets. Le but de cette étude est donc de proposer une méthode d'évaluation du niveau

d'effort investi par le sujet lors de la réalisation du pattern en anti-phase afin de démontrer que les niveaux de stabilité observés sont infiniment liés avec le niveau d'allocations des ressources du sujet.

3-1-1 L'approche probabiliste

Depuis plusieurs années, la considération de systèmes physiques, économiques, ou encore biologiques sous l'angle de l'approche dynamique a permis de repositionner certains concepts physiques et de révolutionner certains paradigmes. On a effectivement longtemps pensé que l'évolution de ces systèmes était déterminée par une équation différentielle dite *déterministe* dont les solutions présentaient un caractère régulier, précis et parfait. Pourtant, bien que capturée par des lois déterministes, force est de constater que les systèmes dynamiques non linéaires présentent des solutions stables et instables. Ces systèmes, très simples dans leur définition, en termes de degrés de liberté, sous-entendent la présence de fluctuations dans leur comportement. Ces systèmes dits chaotiques sont donc imprévisibles, ce que justifie le fait que nous sommes incapables de faire des prévisions à long terme.

Cette notion d'imprévisibilité d'un système chaotique ne permet plus d'adopter l'attitude mathématique émise par Laplace (1814), qui soutenait l'idée que tout système est déterministe si la connaissance exacte de son état initial permet de prédire son futur avec certitude. Cette impossibilité d'évaluer l'évolution des systèmes déterministes chaotiques rend compte de leur propriété fondamentale : deux conditions initiales peuvent conduire à des états très différents du système, car elles ne peuvent être contrôlées avec une précision infinie (Haken et Wunderlin, 1990, p. 1251, Ruelle, 1992).

Le mathématicien Poincaré indiquait déjà “ qu'il peut arriver que des petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers ” (Poincaré, 1908, p. 69). Cette caractéristique essentielle d'amplification des écarts entre toutes les solutions possibles d'un système chaotique, se nommant *la sensibilité aux conditions initiales*, explique pourquoi il est très difficile de prévoir l'état d'un système dynamique avec une grande précision. Ainsi la partie déterministe qui gouvernerait le hasard dans le comportement du système apparaît dans l'interaction

de ces deux notions paradoxales : déterminisme et chaos. Le système est déterministe mais les équations différentielles non linéaires et les conditions initiales spécifient en pratique le comportement aléatoire, se définissant alors par l'absence d'états stationnaires idéalement stables (i.e. un équilibre).

On dit que le système possède la propriété “ sensibilité aux conditions initiales ” si des fluctuations arbitrairement petites finissent par créer des divergences macroscopiques. Dès lors, on peut distinguer des systèmes dynamiques pour lesquels le caractère chaotique entraîne de petits effets et ceux pour lesquels son influence est dominante. Pour les premiers, un comportement est macroscopiquement stable au voisinage de l'équilibre par rapport au grand nombre des mouvements microscopiques, c'est-à-dire des fluctuations subies par le système. Dans le second cas, il arrive que le comportement dynamique observé perde toute régularité. Dans ce contexte, sous l'effet de variations de contraintes ou d'une petite perturbation, le système peut être entraîné à adopter des comportements radicalement différents ou nouveaux. L'émergence de ce nouvel ordre macroscopique ou attracteur constitue une des propriétés majeures du système. Comme nous l'avons déjà signalé, le phénomène de transition est alors la conséquence de l'accroissement des effets non linéaires du système.

Bien que la dynamique non linéaire des systèmes complexes permette de décrire qualitativement leurs comportements, les notions à priori paradoxales du déterminisme et de l'imprévisibilité exigent de reconsidérer les modalités d'analyse et les outils de prédiction de l'état futur ou de l'état final d'un système complexe. Basés sur les idées de Poincaré (1908) (la sensibilité aux conditions initiales et la distinction entre déterminisme et prédictibilité), les travaux de Kolmogorov (1931, 1933) ont fortement démontré la nécessité d'utiliser les arguments probabilistes pour rendre compte des lois d'évolution de l'ensemble des trajectoires possibles d'un système. Dès lors, l'analyse des distributions de probabilité s'impose. En effet, les fluctuations présentes dans les systèmes impliquent que les lois déterministes intrinsèques de la dynamique du système s'expriment “ en termes des propriétés de l'évolution de probabilités ” (Prigogine, 1994, p. 51). Il devient donc possible de prédire le comportement du système, bien que ce même comportement dépende entièrement de tous les éléments microscopiques qui composent le système complexe, mais “ ces prédictions doivent être de nature probabiliste ” (Parisi, 1999, p. 561).

Ainsi au niveau statistique apparaissent des solutions nouvelles irréductibles à l'étude des trajectoires du système. Puisqu'une distribution de probabilité représente un ensemble de trajectoires, l'évolution temporelle d'un système doit être prédite à ce niveau. Ces ensembles sont effectivement plus riches et plus informationnels que les trajectoires isolées. Dans le cas de systèmes stables, l'étude des trajectoires ou des distributions de probabilité donne des résultats équivalents. Mais il n'en pas de même pour les systèmes chaotiques et instables. Alors que l'étude des trajectoires ne fait qu'illustrer "le désordre" provoqué par le caractère chaotique du système, les distributions de probabilité ont un comportement parfaitement régulier. On peut donc parler de lois d'évolution des systèmes aléatoires mais seulement à un niveau probabiliste. Les probabilités se justifient donc au-delà de l'étendue des théorèmes mathématiques et acquièrent une signification dynamique intrinsèque.

3-1-2 Détermination de la force intentionnelle, c_{int}

Dans le domaine du comportement moteur et de l'étude des coordinations motrices, une approche dynamique des systèmes complexes ne peut faire l'économie du raisonnement probabiliste. Bien que l'évolution des patterns spontanés de la tâche de coordination bimanuelle soumis à une contrainte intentionnelle soit capturée par une fonction de potentiel déterministe,

$$V(\phi) = -a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c_{int} \cos(\phi - \psi_{int}) \quad (26)$$

le processus stochastique qui découle de la présence de fluctuations

$$\dot{\phi} = \frac{dV(-a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c_{int} \cos(\phi - \psi_{int}))}{d\phi} + \sqrt{Q} \xi_t \quad (27)$$

implique une étude des distributions de probabilités pour déterminer la différence réelle entre la nature des contraintes intentionnelles. Les conséquences "probabilistes" de cette sensibilité du comportement aux conditions initiales semblent être un moyen pertinent pour renforcer les modèles de l'approche dynamique dans l'investigation de l'interface cognitivo-dynamique de la performance motrice (Davids, Bennett, Court, Tayler & Button, 1997; Davies, Handford & Williams, 1994). Puisque le système de contraintes liées à l'environnement, à la tâche et au sujet lui-même (Newell, 1986) limite le processus d'auto-organisation de tous les éléments du système, les conditions

initiales dans lesquelles se trouvent le système sont le résultat de l'influence de l'ensemble de ces contraintes. Ainsi on ne peut plus négliger le rôle joué par les contraintes spécifiques telles que les émotions et les intentions.

En fonction des contraintes qui pèsent sur le système considéré, le comportement moteur présente différents états. En effet, de nombreuses études montrent que des changements qualitatifs ou quantitatifs apparaissent selon l'évolution ou/et la modification des conditions dans lesquelles s'auto-organise le système (e.g., Amazeen *et al.*, 1997; Mottet & Bootsma, 1999; Nourrit *et al.*, 2000; Scholz et Kelso, 1990; Temprado *et al.*, 1999). Ces modifications du comportement sont dues à la présence des forces stochastiques reflétant les interactions entre tous les éléments microscopiques du système. Elles provoquent des fluctuations constantes autour de l'état adopté par le système et ont tendance à éjecter ce dernier hors de son potentiel d'attraction.

3-1-2-1 Les processus stochastiques

Ces fluctuations, originellement modélisées par la théorie de Langevin (1908) du mouvement brownien (Kac & Logan, 1979; Lavenda, 1987), représentent un ensemble des valeurs instantanées possibles, selon une loi statistique définie, et ont par définition une moyenne de 0. Ayant établi les propriétés de cette force de fluctuations, on peut alors calculer toutes les propriétés du mouvement du système, qui est alors considéré comme un processus stochastique. Ce dernier représente des systèmes qui évoluent dans le temps en termes de probabilités ou plus simplement des systèmes dans lesquels une variable aléatoire $X(t)$ existe (Gardiner, 1985, p. 42).

L'état du système, noté $E_x(t)$, est donc une grandeur aléatoire qui, fonction de t (le temps), est appelée fonction aléatoire. De plus à chaque valeur x de la variable X , on peut faire correspondre une probabilité d'état $P\{X(t) = x(t)\}$, qui est elle-même fonction de t . Si l'ensemble des valeurs possibles pour une variable est infini non dénombrable, c'est-à-dire si elle peut prendre toutes les valeurs dans un intervalle, la variable $X(t)$ est dite continue. La loi de probabilité qui permet d'associer à chacune des valeurs possibles de $X(t)$ continue la probabilité correspondante porte le nom de *densité de probabilité* (ou fonction de densité), $f(x)$, et présente les propriétés suivantes (Belorizki, 1998) :

(1) La valeur de la fonction $f(x)$ est toujours non négative : $f(x) \geq 0$, pour tout x réel.

(2) L'aire totale entre la courbe et l'axe des abscisses est égale à 1 :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (28)$$

(3) La probabilité, $P(a \leq X \leq b)$, que la variable aléatoire X soit comprise entre les limites a et b , est égale à l'aire entre l'axe des abscisses, délimitée par les valeurs a et b , et la courbe $f(x)$:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx = 1 \quad (29)$$

(4) $f(x) = dF(x)/dx$ où $F(x)$ est la fonction de répartition de X , exprimant la probabilité que X prenne un résultat inférieur ou égal à une valeur x :

$$F_X(x,t) = P[X(t) \leq x] \quad (30)$$

3-1-2-2 Les processus de Markov à transition continue : l'équation de Fokker-Planck

A l'intérieur de tous les types possibles des processus stochastiques, l'équation 27 (voir plus haut) rend compte d'un processus stochastique appelé processus de Markov. Ce dernier décrit l'évolution aléatoire d'un système pouvant prendre, à des instants $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ successifs, des états $E_0(t_0), E_1(t_1), \dots, E_i(t_i), \dots$ de telle sorte qu'un état $E_i(t_i)$ ne dépende que d'un nombre fini r des états qui le précèdent. L'hypothèse fondamentale de ce type de processus est de ne faire dépendre un état futur que du seul état présent, ce qui entraîne que le passé tout entier est contenu dans le présent. Le processus est sans mémoire (voir par exemple, Rozanov, 1982). La variable aléatoire $X(t+h) - X(t)$ où h est positif dépend non pas de toute l'évolution passée du système considéré, mais seulement de son aboutissement final, à savoir la valeur $X(t)$ prise par X à l'instant t .

Dans le cas d'un processus de Markov à paramètre temporel continu et à transition continue, la grandeur aléatoire $X(t)$ s'identifie à l'ensemble continu des nombres réels. Dans un court intervalle de temps, l'état du système subit seulement une petite variation. Les états d'un système étant caractérisés par la grandeur aléatoire X de

l'ensemble des réels, supposons que la variable $X(t)$ prenne les valeurs x_1 au temps t_1 et x au temps t tel que $t_1 < t$, la densité de probabilité de transition $f(x_1, t_1; x, t)$ telle que la transition $x_1(t_1) \rightarrow x(t)$ s'écrive :

$$F(x_1, t_1; x, t) = \int_{-\infty}^x f(x_1, t_1; x, t) dx \quad (31)$$

avec $f(x_1, t_1; x, t) \geq 0$ et $\int_{-\infty}^x f(x_1, t_1; x, t) dx = 1$

Mathématiquement, un processus stochastique est dit continu si pour tout $\varepsilon > 0$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P \{ |X(t + \Delta t) - X(t)| > \varepsilon \} = 0 \quad (32)$$

On définit alors les limites suivantes pour $\Delta t \rightarrow 0$ et x_1 aussi voisin de x qu'on le désire de telle sorte que $|x - x_1| < \varepsilon$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{x_1}^x (x - x_1) f(x_1, t; x, t + \Delta t) dx_1 = a(x, t) \quad (33)$$

et

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{x_1}^x (x - x_1)^2 f(x_1, t; x, t + \Delta t) dx_1 = b(x, t) \quad (34)$$

Sous réserve de l'existence des dérivées, on établit les deux formes différentielles de Kolmogorov :

1. Forme différentielle dite du passé :

$$\frac{\partial}{\partial t_1} f(x_1, t_1; x, t) + a(x_1, t_1) \frac{\partial}{\partial t_1} f(x_1, t_1; x, t) - \frac{1}{2} b(x_1, t_1) \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} f(x_1, t_1; x, t) = 0 \quad (35)$$

2. Forme différentielle dite du futur :

$$\frac{\partial}{\partial t_1} f(x_1, t_1; x, t) + \frac{\partial}{\partial x} [a(x_1, t_1) f(x_1, t_1; x, t)] - \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [b(x, t) f(x_1, t_1; x, t)] = 0 \quad (36)$$

Cette équation (36) appelée également l'équation de Fokker-Planck (Ash & Gardner, 1975, chap. 5; Gardiner, 1985, chap. 3; Kac & Logan, 1979, pp. 1-60; Prabhu,

1965, chap. 3; Rosenblatt, 1974, chap. VI), permet de caractériser les différentes fonctions de probabilités (de transition, stationnaires) sur la base de l'équation 7 :

$$\dot{P}(\phi, t) = \frac{\partial}{\partial \phi} \{V(\phi)P(\phi, t)\} + \frac{Q}{2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} P(\phi, t) \quad (37)$$

3-1-2-3 Modalité de calculs de la force intentionnelle, c_{int}

Ainsi comme le montrent Schöner *et al.* (1986) ou Schöner et Kelso (1988), les distributions stationnaires pour les deux états stables du système ($\phi = 0$; $\phi = \pi$), pour lesquelles $\dot{P}(\phi, t) = 0$, peuvent être déterminées. Elles représentent la probabilité que chaque intervalle de $[-\pi/2, 3\pi/2] \text{ mod } 2\pi$ soit occupé par le système (Haken *et al.*, 1985). Lorsque le paysage des attracteurs présente un régime bistable, la distribution présente deux pics correspondant aux deux états stationnaires du système. De plus, la hauteur du pic représente la quantité de temps passé par le système sur l'attracteur, ce qui est un indice de son niveau de stabilité.

Puisque la fonction de potentiel (équation 4) est fonction du temps et de la fréquence d'oscillation, et plus exactement du rapport b/a , les distributions stationnaires permettent de déterminer les paramètres a et b .

Pour le pattern en phase :

$$P_{st}(\phi) = \frac{g}{\sqrt{\pi} \text{erf}(\pi g)} \exp[-g^2 \phi^2] \quad (38)$$

avec $g = \sqrt{(4b + a)/Q}$ et erf représentant la fonction erreur²².

Pour le pattern en anti-phase :

$$P_{st}(\phi) = \frac{h}{\sqrt{\pi} \text{erf}(\pi h)} \exp[-h^2 (\pi - |\phi|)^2] \quad (39)$$

²² C'est la fonction $\Phi(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times \int_0^t e^{-x^2/2} dx$ qui correspond à l'aire délimitée par la courbe de

Gauss, normalisée de telle sorte que $\Phi(\infty) = 1$.

avec $h = \sqrt{(4b - a)/Q}$.

Une fois que le système dont les paramètres liés à la fréquence d'oscillation et du bruit gaussien sont fixés, la distribution stationnaire " intentionnelle ", P_{sti} , peut être déterminée (Collins & Turvey, 1997; Mitra *et al.*, 1998) :

$$P_{sti}(\phi) = Ne^{-(-a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) - c \cos(\phi - \psi)) / Q} \quad (40)$$

où N est la constante de normalisation qui garantit que le volume représenté par l'équation est égale à 1 pour $[-\pi/2 < \phi \leq 3\pi/2] \text{mod} 2\pi$. Une régression non linéaire permet alors d'estimer le paramètre c_{int} qui s'ajuste au mieux à cette distribution P_{sti} .

Puisque les intentions permettent de modifier qualitativement et quantitativement la dynamique des patterns de coordination lors d'une tâche bimanuelle (Lee *et al.*, 1996; Scholz et Kelso, 1990), cette étude se propose de montrer que ces modifications sont bien liées à un niveau quantitativement différent de l'investissement intentionnel des sujets. Sur la base des résultats précédemment présentés (i.e. la variabilité du pattern anti-phase est significativement plus faible pour une force intentionnelle, induite par l'instruction " intention augmentée ", importante), nos hypothèses sont les suivantes :

- Les valeurs de c_{int} calculées lors de la réalisation des essais en anti-phase sous " intention augmentée " sont significativement supérieures à celles estimées sous " intention de base ".
- Cette différence quantitative de c_{int} est bien liée au niveau de variabilité du pattern en anti-phase requis.

3-2 Méthode

3-2-1 Sujets, appareillage et procédure

Pour répondre à nos hypothèses, nous avons repris les données expérimentales issues de l'expérimentation précédente portant sur "l'influence de la force de l'intention sur le niveaux de fluctuations des patterns spontanés de la tâche de coordination bimanuelle". Dès lors, nous ne reviendrons pas sur la procédure expérimentale adoptée (cf. point 2-2, p. 76). Nous nous contentons d'exposer les méthodes d'analyse des résultats sous la forme des distributions de probabilités et les traitements statistiques.

3-2-2 Analyses des données et traitements statistiques

Au regard des résultats observés sur le niveau de fluctuations de la phase relative et de nos hypothèses, nous avons seulement considéré les essais réalisés sur le mode en anti-phase. En effet, un investissement d'effort est théoriquement nécessaire pour restaurer à son niveau un potentiel d'attraction, et ce principalement pour des fréquences sur-critiques d'oscillation.

Nous avons donc repris les données et les patterns de résultats de la variabilité de la phase relative ϕ , calculée sur 25 secondes (de la 3^{ème} à la 28^{ème} seconde de l'essai), soit 2500 données (cf. point 2-2-3-3, p. 78 et point 2-3-4-2, p. 82).

Les distributions de probabilité $P(\phi)$ ont été calculées afin de déterminer, dans un premier temps les paramètres a et b de l'équation de potentiel (4) pour chaque fréquence. Pour ce faire, l'étendue 2π de ϕ a été divisée en 36 intervalles de $2\pi/36$ radians. Comme cela est indiqué dans les travaux de Collins et Turvey (1997) ou de Rajasekar, Valsakumar et Raj (1998), la probabilité relative p de chaque cellule est égale à n_i / n , avec n_i le nombre de points qui rentre dans chaque intervalle i , et n le nombre total de points. Par exemple, le nombre total de points pour la fréquence 1 est 160 000 points (2500 * 2 essais * 4 sessions * 8 sujets). $P_{st}(\phi)$ est alors la fréquence relative p divisée par la grandeur de l'intervalle. Afin d'évaluer les effets de la fréquence sur le paysage des attracteurs, les paramètres a et b sont alors déterminés avec les données expérimentales de tous les sujets et de toutes les sessions pour chaque fréquence par une régression non linéaire de l'équation (39) (i.e. le pattern en anti-phase).

Sur la base de ces données des paramètres a et b , la force de l'intention, c_{int} de l'équation 25, a été évaluée pour tous les sujets à l'intérieur des 4 sessions expérimentales. Pour chaque sujet et pour toutes sessions, les distributions de probabilité ont été déterminées sur les deux essais de même fréquence. Dès lors, le paramètre c_{int} a été déterminé par une régression non linéaire de l'équation (40), dans laquelle ont été placés les paramètres a et b , déterminés précédemment, et représentatifs de la fréquence considérée.

Cette variable dépendante, valeurs de c_{int} , a été soumise à une ANOVA à mesures répétées avec le groupe ($\times 2$) comme facteur inter-sujets, et la session ($\times 4$) et la fréquence ($\times 5$) comme facteurs intra-sujets. Des tests post-hoc de type Tukey HSD ont été réalisés à la suite des effets significatifs et le seuil de significativité était de $p < 0.05$.

3-3 Résultats

3-3-1 Les paramètres a et b , fonction de la fréquence proposée

Ces paramètres, qui représentent l'influence de la fréquence d'oscillation imposée aux sujets, ont été déterminés pour les 5 fréquences manipulées : $F1 = F_c - 0.5\text{Hz}$, $F2 = F_c - 0.25\text{Hz}$, $F3 = F_c$, $F4 = F_c + 0.25\text{Hz}$ et $F5 = F_c + 0.5\text{Hz}$. Les résultats montrent que les paramètres a et b , et tout particulièrement le rapport b/a , sont différents selon la fréquence d'oscillation (tableau 2). Bien que ces paramètres aient été déterminés sur des données expérimentales où un investissement intentionnel était exigé aux sujets, ils démontrent que la fréquence influence le paysage des attracteurs. En effet, la dynamique du système présente un régime monostable pour la fréquence la plus importante $F5$ ($b/a \cong 0.25$).

Fréquences d'oscillation	a	b	b/a	r ²
F1 (Fc - 0.5Hz)	1.192	1.155	0.969	0.923
F2 (Fc - 0.25Hz)	2.095	1.130	0.539	0.859
F3 (Fc)	2.759	1.220	0.442	0.869
F4 (Fc + 0.25Hz)	5.118	1.710	0.334	0.881
F5 (Fc + 0.5Hz)	34.131	8.907	0.260	0.912

Tableau 2 : Valeurs des paramètres a et b et du rapport b/a selon la fréquence d'oscillation testée lors de la réalisation du pattern en anti-phase.

3-3-2 Le paramètre c_{int} , la force de l'intention

L'analyse de variance indique en premier lieu un effet significatif du facteur groupe ($F_{1,6} = 11.546$; $p < 0.05$) : les sujets du groupe 2, qui ont été soumis deux fois à l'instruction "intention augmentée" au cours de cette expérimentation, présentent des valeurs de c_{int} plus importantes que celles du groupe 1. Le second effet observé concerne le facteur session ($F_{3,18} = 9.079$; $p < 0.001$). Les analyses post-hoc révèlent que les valeurs de c_{int} sont différentes entre la session 2 et la session 3 ($p < 0.01$) et entre la session 2 et la session 5 ($p < 0.05$). Une différence entre la session 4 et la session 5 est également observée ($p < 0.05$). Mais le résultat le plus intéressant est représenté par l'interaction groupe \times session ($F_{3,18} = 3.197$; $p < 0.05$). Cette dernière est localisée par la différence de c_{int} entre la session 2 et la session 3 pour le groupe 2. Aucune différence entre les deux groupes n'est observée lors des sessions 2, 4 et 5 (figure 10).

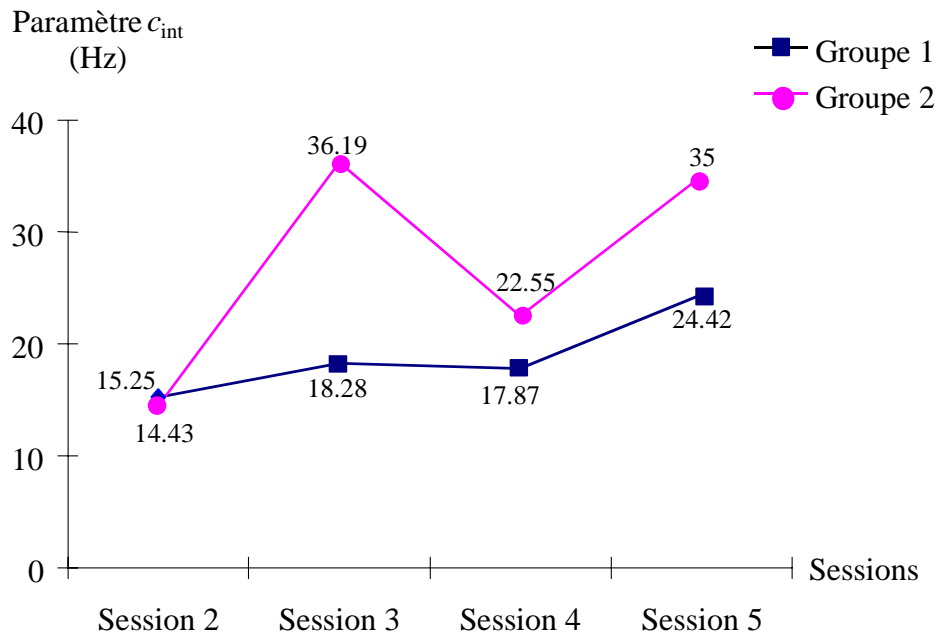


Figure 10 : Valeurs du paramètre c_{int} pour les 4 sessions expérimentales et les deux groupes.

Puisque aucun effet du facteur fréquence n'est observé, il est fortement soupçonné que les différents ajustements de a et b , fonction de la fréquence testée (cf. point précédent 3-3-1, p. 102), impliquent une influence plus ou moins importante de la dynamique intrinsèque sur le comportement intentionnel résultant (e.g., Scholz & Kelso, 1990; Serrien & Swinnen, 1999). Qui plus est, chaque valeur de c_{int} a été estimée avec les valeurs des paramètres a et b correspondantes à la fréquence testée. En conséquence, des analyses fréquence par fréquence s'imposaient. Une ANOVA à mesures répétées 2 (groupe) \times 4 (session) a été alors réalisée pour chaque fréquence d'oscillation.

Les analyses des 3 premières fréquences ($F1 = Fc - 0.5\text{Hz}$; $F2 = Fc - 0.25$; $F3 = Fc$) n'indiquent aucun effet significatif. En revanche, l'analyse de la première fréquence sur-critique ($F4 = Fc + 0.25\text{Hz}$) révèle d'une part des effets principaux du facteur groupe ($F_{1,6} = 10.77$; $p < 0.05$) et du facteur session ($F_{3,18} = 9.511$; $p < 0.001$), et d'autre part une interaction groupe \times session ($F_{3,18} = 3.912$; $p < 0.05$). Les comparaisons post-hoc montrent que cette différence entre les deux groupes est spécifiquement localisée lors de la session 3 ($p < 0.05$) et de la session 5 ($p < 0.05$) (figure 11).

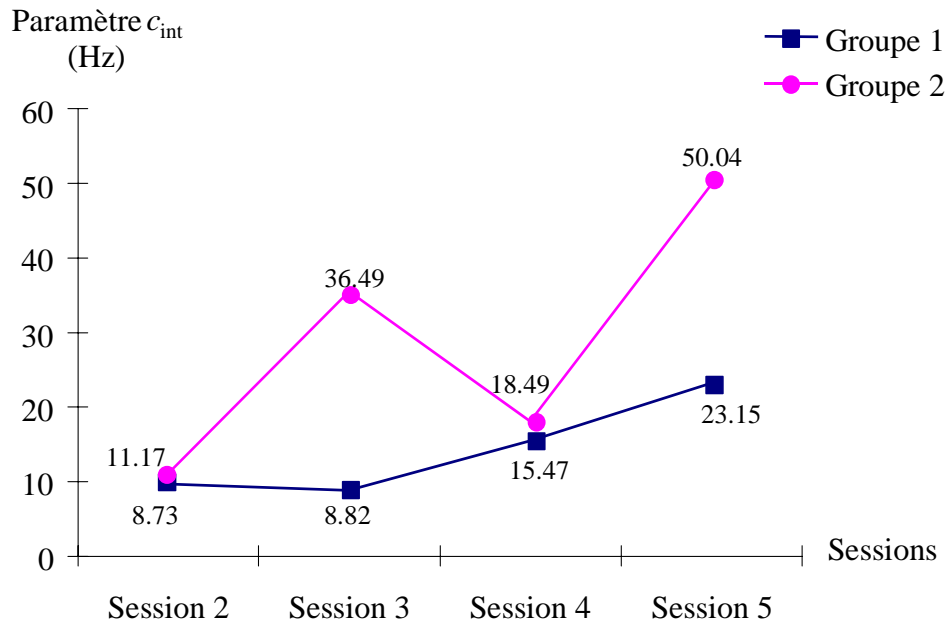


Figure 11 : Evolution des valeurs de c_{int} au cours des 4 sessions expérimentales pour les 2 groupes, lors de la réalisation du pattern en anti-phase à F_4 ($F_c + 0.25Hz$).

L'analyse de la 5^{ème} fréquence ($F_5 = F_c + 0.5Hz$) montre un effet du facteur groupe ($F_{1,6} = 28.331$; $p < 0.01$) et un effet du facteur session ($F_{3,18} = 5.823$; $p < 0.01$). Pour ce dernier, les tests post-hoc indiquent une différence entre la session 2 et la session 3 ($p < 0.05$), ainsi qu'entre la session 2 et la dernière session ($p < 0.01$). Aucune interaction n'est observée (figure 12).

3-3-3 Effets des instructions sur la variabilité du pattern en anti-phase

Au regard de nos hypothèses, rappelons juste à ce niveau les résultats les plus importants. Lors de la session 3, l'ANOVA à mesures répétées 2 (groupe) \times 5 (fréquence) révèle un effet groupe ($F_{1,6} = 10.08$, $p < 0.05$) et une interaction groupe \times fréquence ($F_{4,24} = 3.98$; $p < 0.05$). Les comparaisons post-hoc montrent une augmentation de la variabilité de la phase relative lors des essais réalisés aux 2 fréquences sur-critiques pour le groupe 1 ($F_4 = F_c + 0.25Hz$ et $F_5 = F_c + 0.5Hz$).

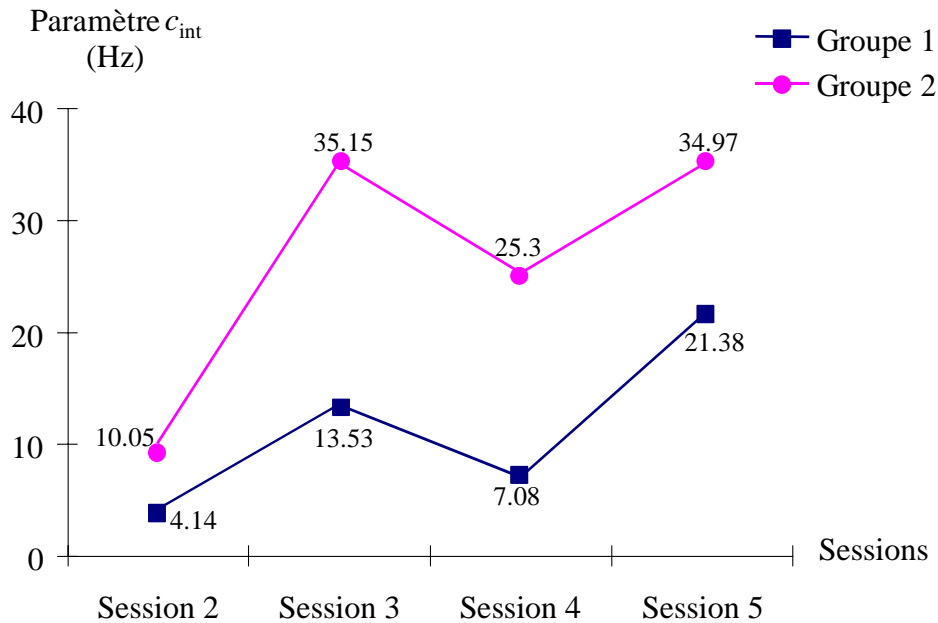


Figure 12 : Evolution des valeurs de c_{int} au cours des 4 session expérimentales pour les 2 groupes, lors de la réalisation du pattern en anti-phase à fréquence d'oscillation $F5 (F_c + 0.5Hz)$.

Afin de visualiser le lien entre le niveau d'effort investi par les sujets et le niveau de variabilité de la phase relative, la figure 13 représente les effets observés pour ces variables dépendantes, lors de la réalisation du pattern en anti-phase à fréquence sur-critique ($F4$).

3-4 Discussion

3-4-1 Interprétation des résultats

Le but de cette étude était de proposer une méthode d'évaluation de la force de l'intention (le paramètre c_{int} de l'équation 25) afin de *définir le réel lien* entre les modifications qualitatives et quantitatives de la dynamique spontanée et l'influence de l'état motivationnel du sujet. Comme nous l'avons déjà démontré, l'étude de la variabilité de la phase relative a bien confirmé l'effet d'un *effort augmenté* ("increased effort", Scholz & Kelso, 1990, p. 105) sur le maintien du pattern en anti-phase. Cet investissement intentionnel plus important s'est traduit par une meilleure stabilité du pattern en anti-phase.

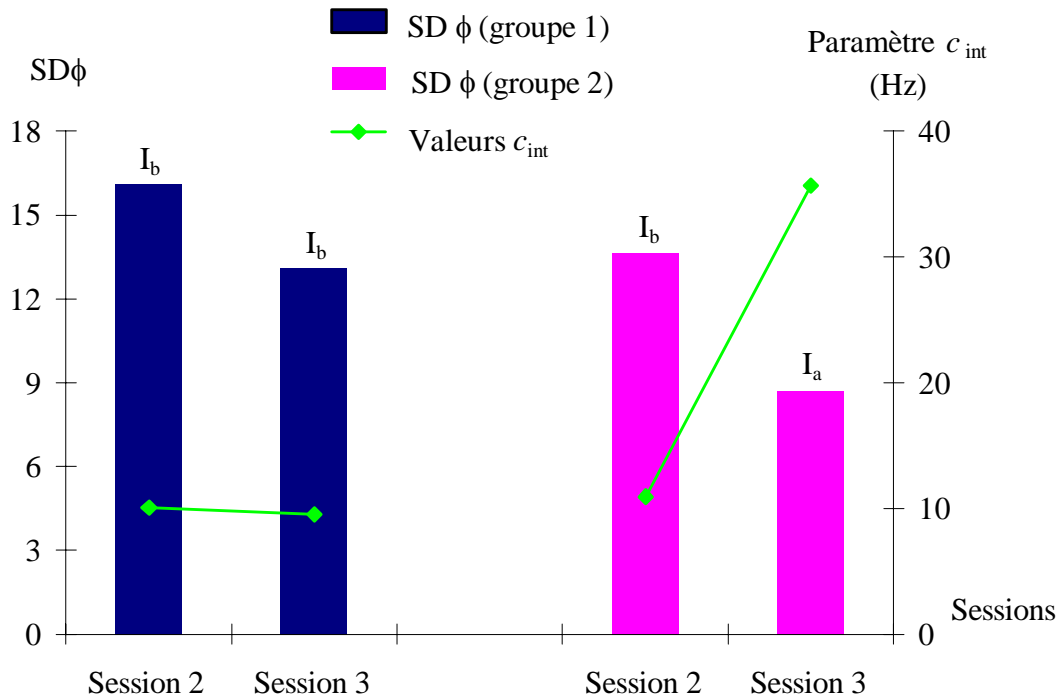


Figure 13 : Représentation (1) des valeurs de c_{int} en fonction de la nature des instructions reçues par les 2 groupes (I_b = Instruction de base; I_a = Instruction augmentée) et (2) des niveaux de variabilité du pattern en anti-phase lors de la session 2 et 3, à fréquence d'oscillation $F4$ ($Fc + 0.25Hz$).

Mais ce résultat n'a été observé qu'en situations de compétition, à savoir quand un minimum de la fonction de potentiel (équation 4) était théoriquement absent à $\phi = 180^\circ$. Dans ce cas, les contraintes intentionnelles, et surtout l'effort du sujet, modifiaient les caractéristiques dynamiques du pattern de coordination attendu. La dimension intensive de l'état " motivationnel " du sujet semble donc jouer un rôle *prédominant* dans la réalisation et la stabilité du pattern en anti-phase à hautes fréquences. Par conséquent, la détermination quantitative de cette force de l'intention était essentielle dans la validation de cette hypothèse de prédominance.

Tout d'abord, la modélisation théorique de la dynamique de la tâche bimanuelle et sa description mathématique impliquent l'analyse probabiliste de tous les états possibles. En effet, le processus de transition de phase, sous l'influence d'une augmentation d'un paramètre de contrôle (dans ce cas précis, la fréquence d'oscillation), est le reflet de la présence de non-linéarité et de fluctuations dans le

système. Or la conséquence théorique de ces fluctuations est “ la redéfinition des phénomènes étudiés en cherchant les lois probabilistiques des variables macroscopiques qui rendent compte de ces phénomènes ” (Kac & Logan, 1979, p. 3). Cette propriété fondamentale, largement reconnue aujourd’hui, impose la détermination et la lecture des coordinations motrices sur l’ensemble de toutes les trajectoires possibles du système. Dès lors les fonctions de distributions ont été estimées pour satisfaire ces exigences théoriques et méthodologiques (e.g., Collins & Turvey, 1997; Parisi, 1999; Schöner *et al.*, 1986).

Ainsi la distribution stationnaire a permis d’estimer les paramètres a et b de la fonction de potentiel (équation 4) pour le pattern en anti-phase (équation 39). Bien qu’ils aient été déterminés sur des données expérimentales où un investissement intentionnel a toujours été exigé, les résultats sont cohérents par rapport aux effets attendus de l’augmentation de la fréquence sur la dynamique intrinsèque du système (Haken *et al.*, 1985). Le potentiel d’attraction du pattern en anti-phase devient de moins en moins important et finalement tend à prendre le statut de repellant à la fréquence la plus haute ($F_5 = F_c + 0.5\text{Hz}$). Ces déterminations quantitatives des paramètres a et b , et plus précisément l’évolution du rapport b/a , sont donc en accord avec l’effet du processus de transition de phase. Quand la fréquence testée est importante, les propriétés intrinsèques du système sont perturbées. En effet, lors de la session 2, la variabilité du pattern en anti-phase augmente proportionnellement suivant les différentes conditions de fréquence. Bien que tous les sujets résistent et maintenaient le pattern en anti-phase, la force de l’intention relative à l’instruction “ intention de base ” semble insuffisante pour contrarier pleinement l’effet du paramètre de contrôle.

Les résultats concernant le paramètre c_{int} confirment la différence quantitative du niveau d’allocation des ressources selon la nature des instructions intentionnelles prescrites. L’investissement intentionnel du groupe 2, soumis à “ l’intention augmentée ” lors de la session 3, était plus important que celui du groupe 1, placé sous “ intention de base ”. De plus, lors de la dernière session où il était demandé à tous les sujets de “ faire le maximum d’effort et de se concentrer au maximum...” (i.e. “ intention augmentée ”), nous avons observé des différences significatives des valeurs de c_{int} entre cette session 5 et la session 2, mais aussi avec la session 4. Puisque que tous les sujets étaient soumis à l’instruction “ intention de base ” lors des sessions 2 et 4,

l'instruction "intention augmentée" induit réellement un investissement intentionnel *quantitativement* différent. Cette différence prouve la *prédominance* des effets de la force de l'intention sur la dynamique du pattern en anti-phase.

Cependant, on se doit de relativiser cette idée de dominance en fonction de l'effet des fréquences d'oscillation sur le potentiel. Lorsque ce dernier reste théoriquement bistable, la stabilité du pattern en anti-phase n'est pas modifiée, quelle que soit la nature des instructions. En effet, aucune différence de stabilité n'a été pour les trois plus faibles fréquences (F1, F2, F3) entre les deux groupes lors de la session 3 ($G1 = I_b$ et $G2 = I_a$). Ce résultat suggère fortement que la dominance de la dynamique intrinsèque sur la stabilité du système perdure dans les situations de convergence. Bien que le potentiel soit altéré par l'augmentation de la fréquence (cf. les rapports b/a , point 3-3-1, p. 102), l'effort investi par les sujets est suffisant pour maintenir un niveau de stabilité comparable à la stabilité intrinsèque. La différence attendue dans l'investissement intentionnel des sujets joue un rôle négligeable sur la dynamique du système.

Dans leur article, Scholz et Kelso (1990) soutenaient "qu'en présence d'influence intentionnelle, les patterns de coordination devraient présenter des niveaux de stabilité relativement comparables aux niveaux intrinsèques, même pour des fréquences sur-critiques" (p. 119). Mais leurs résultats montraient clairement qu'à fréquences d'oscillation importantes, la dynamique intrinsèque du système était prédominante sur le comportement résultant. Ils expliquaient cette dissonance avec le modèle Schöner et Kelso (1988a) en supposant une plus faible force intentionnelle investie par leurs sujets "naïfs" que celle simulée dans le modèle.

Mais dans notre protocole, il est important de relever en premier lieu que nos sujets ne correspondaient pas à des sujets "naïfs" puisqu'il leur était explicitement demandé de soutenir un investissement intentionnel tout au long de l'expérimentation, que ce soit entre ou au sien même des sessions. Deuxièmement, les résultats des valeurs de c_{int} estimées aux deux fréquences sur-critiques ($F4 = F_c + 0.25\text{Hz}$ et $F5 = F_c + 0.5\text{Hz}$) ne supportent pas l'idée d'une dominance des propriétés intrinsèques sur la stabilité résultante du pattern en anti-phase. En effet, l'influence de deux instructions intentionnelles différentes sur la variabilité du pattern en anti-phase a clairement été

observée. Les fluctuations de la phase relative étaient significativement plus faibles pour le groupe 2 que celles mesurées pour le groupe 1 lors de la session 3. Une mobilisation importante d'effort provoque une diminution de la stabilité du pattern 180° réalisée à des fréquences sur-critiques. La forte influence du paramètre de contrôle (capturée par le rapport b/a) est pleinement *annihilée* par la force de l'intention investie par les sujets.

L'estimation quantitative du paramètre c_{int} confirme cette hypothèse. En ce qui concerne la fréquence F4, le résultat le plus intéressant à relever est l'interaction groupe \times session localisée entre la session 2 et 3 (voir figure 12). Elle indiquait que le groupe 2 présentait une force intentionnelle plus importante lors de la session 3 que celle du groupe 1. Premièrement, ce résultat confirme la pertinence des instructions prescrites aux sujets et la différence qu'elles impliquaient en termes d'investissement intentionnel. Deuxièmement, il renforce l'idée d'un rôle prédominant de la force de l'intention sur la stabilité du pattern en anti-phase lorsqu'il est réalisé en compétition avec la dynamique intrinsèque du système.

Une différence dans les valeurs de c_{int} a également été observée entre les deux groupes lors de la session 5, où tous les sujets étaient placés sous l'instruction "intention augmentée". Mais le niveau d'investissement intentionnel du groupe 1 semble être suffisant pour maintenir le pattern 180° avec une faible variabilité : la stabilité n'était pas significativement différente entre les deux groupes. Le fait qu'un investissement intentionnel important n'induit pas toujours une diminution de la stabilité du système peut constituer la première explication possible. Quand le sujet atteint un niveau minimal de fluctuations, spécifique aux caractéristiques du pattern en anti-phase, aucune amélioration supplémentaire ne pourrait être observée. Cette variabilité "*basique*", inhérente à l'activité des sous-systèmes et aux propriétés stochastiques du système (Schöner *et al.*, 1986), ne peut être diminuée, même sous l'influence de contraintes intentionnelles. La seconde explication repose sur une meilleure capacité du sujet à allouer ces ressources intentionnelles (Scholz et Kelso, 1990). Bien que cette étude ne s'inscrive pas directement dans une logique d'apprentissage, il peut être suggéré que les sujets aient développé leur capacité à maintenir le pattern en anti-phase, même à fréquences sur-critiques, et leur capacité à mobiliser leurs intentions. Cette possibilité peut très bien supporter l'hypothèse d'une

amélioration de la dynamique d'apprentissage d'un pattern de coordination sous l'effet d'un important investissement intentionnel, spécialement en situations de compétition.

Les résultats observés à fréquence F5 semblent confirmer cette hypothèse. Avec la pratique, la prédominance de l'influence d'un investissement intentionnel nécessaire pour réaliser le pattern en anti-phase tend à diminuer. Lorsque la situation devient moins compétitive avec la dynamique du système (par exemple, après apprentissage, voir Zanone & Kelso, 1992, 1994, 1997), sa stabilité est de nouveau dominée par ses propres caractéristiques. En effet, en moyenne, nous avons observé des valeurs de c_{int} plus importantes pour le groupe 2 que pour le groupe 1. Cette différence de la force de l'intention est localisée entre la session 2 et la session 3. Par conséquent, il peut être soutenu que l'instruction "intention augmentée" pour le groupe 2 permettait bien un investissement intentionnel plus important. Cette hypothèse est confirmée par les données de stabilité, qui démontraient une plus faible variabilité du pattern en anti-phase pour le groupe 2. Mais aucune différence de la force de l'intention entre les deux groupes lors de la session 5 n'a été observée. Néanmoins le groupe 1 tend à mobiliser moins d'effort. Comme il n'y a pas de différences en termes de stabilité pour cette session, il semble que l'investissement intentionnel des sujets du groupe 1 soit suffisant pour stabiliser le pattern en anti-phase.

3-4-2 La difficulté perçue, une nouvelle perspective?

L'hypothèse de la réelle influence de la stabilité intrinsèque sur le potentiel intentionnelle résultant peut être supportée par l'étude de l'évaluation spontanée de l'effort requis pour réaliser les différents patterns de la tâche bimanuelle. On peut ainsi faire l'hypothèse que le niveau d'effort nécessaire à la réalisation d'un pattern est lié à son positionnement dans le paysage des attracteurs, autrement dit selon la nature de la tâche proposée, soit de convergence ou de compétition. Dans cette perspective, dans une récente étude (Deschamps, Legros, Lauriot & Delignières, 2000), nous avons simulé le modèle de Schöner et Kelso (1988a) (i.e. équation 25) pour 7 décalages de phase ($\phi = 0^\circ$, $\phi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$, $\phi = 90^\circ$, $\phi = 120^\circ$, $\phi = 150^\circ$ et $\phi = 180^\circ$) et 3 fréquences sous-critiques d'oscillation en recherchant la valeur de c_{int} théorique, c'est-à-dire le niveau d'effort requis pour réaliser une coordination précise (ψ_{int}). En d'autres termes,

on détermine la valeur de c_{int} pour laquelle le pattern visé correspond à l'état stable du système.

De cette simulation, on peut s'apercevoir (1) que les patterns en phase et en anti-phase sont les 2 coordinations nécessitant théoriquement le moins d'effort pour être réalisés par le sujet, (2) que les patterns 30° ou 60° engendrent les investissements intentionnels les plus importants, et tout particulièrement pour le 60°, et (3) que cet investissement intentionnel est respectivement moins important pour la coordination 90°, 120°, et 150°. Pour finir, le quatrième point qui se dégage de cette simulation est l'effet de la fréquence d'oscillation imposée. On remarque, qu'en règle générale, plus le fréquence testée est proche de la fréquence critique, plus la valeur de c_{int} (l'effort) est importante.

Pour tester cette simulation, nous nous sommes basés sur les travaux traitant des relations entre l'effort et le concept de *difficulté perçue* (e.g., Delignières, 1993a, 1993b; Dornic, 1986; Dornic & Birbaumer, 1974; Dornic *et al.*, 1974). Tout particulièrement, Delignières (1993a) a montré que “ la perception de la difficulté est basée sur le niveau d'investissement en ressources du sujet lors de la réalisation de la tâche ”. Ainsi la validation d'une échelle de catégorie, la DP-15, (Delignières, Famose & Genty, 1994) a permis d'estimer cette difficulté perçue, ce nous offrait un moyen opérationnel pour évaluer l'effort du sujet.

12 sujets ont participé à cette expérimentation où la tâche bimanuelle consistait en la réalisation des 7 patterns de coordination simulés à 3 fréquences sous-critiques relatives à la fréquence critique du sujet ($F1 = Fc - 0.9\text{Hz}$, $F2 = Fc - 0.6\text{Hz}$ et $F3 = Fc - 0.3\text{Hz}$). Tout d'abord, un balayage (*scan*) des 7 coordinations a été réalisé afin d'identifier la dynamique intrinsèque de chaque sujet (cf. Zanone & Kelso, 1992, 1997). Puis ce dernier réalisait au cours d'une seconde session expérimentale 42 essais de 30 secondes (2 essais \times 7 coordinations \times 3 fréquences) à la suite desquels il lui était demandé d'en évaluer la difficulté grâce à l'échelle DP-15.

Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (fréquence ($\times 3$) et patterns de coordination ($\times 7$)) ont révélé que les patterns en phase et en anti-phase, dont la réalisation représentait une situation de convergence pour tous les sujets, étaient perçus comme les moins difficile. D'une autre côté, les scores de difficulté perçue

étaient significativement plus important pour la réalisation des 5 autres patterns de coordination ($\phi = 30^\circ$, $\phi = 60^\circ$, $\phi = 90^\circ$, $\phi = 120^\circ$, $\phi = 150^\circ$), tous en compétition avec les caractéristiques intrinsèques du système.

Ces résultats suggèrent qu'un niveau minimal d'effort soit nécessaire pour réaliser des coordinations en compétition avec la dynamique intrinsèque. De plus, ils confirment le modèle de Schöner et Kelso (1988a), dont la simulation indiquait que le pattern 60° impliquait les valeurs de c_{int} les plus importantes pour obtenir un minimum dans la fonction de potentiel. En effet, nous avons observé les scores les plus importants de difficulté perçue (i.e. le niveau de l'effort investi) pour l'évaluation de la réalisation du pattern 30° suivie de celle du pattern 60° (bien qu'aucune différence significative n'ait été observée). Dès lors, il peut être soutenu que la force de l'intention joue un rôle prédominant sur la stabilité du système en fonction (1) de la nature de la tâche proposée (de convergence ou de compétition) et (2) du degré de compétition avec le pattern le plus stable du paysage des attracteurs, à savoir le pattern en phase (Kelso & Scholz, 1985; Kelso *et al.*, 1987), comme nous l'ont démontré les scores de difficulté perçue du pattern 30° et 60° .

La réalisation d'un pattern proche du pattern en phase déclencherait implicitement un investissement intentionnel plus important. Cette hypothèse rejoint les idées émises par Zanone et Kelso (1992) qui suggéraient qu'il serait plus difficile d'apprendre un pattern proche du pattern en phase que du pattern en anti-phase. Pourtant ceci a été largement réfuté dans la littérature, en particulier par les travaux de Fontaine *et al.* (1997). Leurs résultats démontraient que l'apprentissage du pattern 45° et 135° , à égale "distance", respectivement, du pattern 0° et du pattern 180° dans le paysage des attracteurs, suivait la même dynamique. Mais il est essentiel de noter qu'aucune évaluation du niveau d'effort investi par les sujets n'a été réalisée lors de l'apprentissage de ces patterns de coordination, au départ en compétition avec la dynamique du système. On peut ainsi faire les hypothèses que (1) l'apprentissage d'un pattern de coordination induira un niveau d'effort d'autant plus important que ce pattern est proche du pattern en phase, (2) que plus ce niveau d'effort sera important (ce qu'on pourrait induire par une instruction intentionnelle explicite telle que "l'intention augmentée"), plus l'apprentissage sera rapide, et (3) que le niveau d'effort pourrait constituer un critère d'apprentissage complémentaire et pertinent. L'apprentissage se

définirait non seulement par une modification qualitative du comportement (Lee & Swinnen, 1993), mais également par un niveau de stabilité associé un niveau d'effort minimal.

Cependant, quelques interrogations restent à éclaircir quant aux relations entre la difficulté perçue, le niveau de variabilité des patterns de coordination, le niveau d'effort investi par les sujets et les valeurs quantitatives de c_{int} . Si les scores de difficulté perçue confirmaient la simulation théorique du paramètre c_{int} du modèle de Schöner et Kelso (1988a), certains “ paradoxes ” sont apparus dans la lecture des données de stabilité des patterns de coordination testés. Si les sujets ont été capables en règle générale de réaliser et de se positionner sur les patterns exigés, la variabilité des patterns en compétition est significativement plus importante que celle observée pour le pattern 0° et 180° . L'investissement significatif d'effort investi par les sujets lors de la réalisation des 5 patterns en compétition avec la dynamique intrinsèque du système ne semble pas se traduire par une plus faible variabilité de la phase relative. A ce niveau, plusieurs explications peuvent être avancées.

Tout d'abord, les instructions reçues par les sujets correspondaient quelque peu à l'instruction “ intention de base ”. En effet, il était explicitement demandé aux sujets d'essayer de maintenir les décalages dictés par les deux signaux auditifs, qui spécifiaient le pattern à réaliser. Si cette contrainte intentionnelle permettait aux sujets de maintenir le pattern requis, le niveau d'effort correspondant ne semble pas suffisant pour influencer totalement la dynamique du système. En second lieu, cette dernière est vraisemblablement perturbée par une seconde information comportementale, à savoir la contrainte perceptive liée à la discrimination du décalage des deux signaux auditifs. Il peut alors suggérer que la compétition entre les effets respectifs de la contrainte intentionnelle et de la contrainte perceptive (cf. Tuller et Kelso, 1989) n'est pas sans conséquence sur la stabilité observée des patterns de coordination. Dans ce cadre, il est important à noter que nos résultats ne confirment pas les hypothèses de Bingham, Schmidt et Zaal (1999). Ces derniers décrivaient un lien entre la difficulté à percevoir la nature du décalage de phase, le niveau de stabilité et l'effort requis pour maintenir ce décalage (p. 257). Bien que ne traitant que de la propriété perceptible de la phase relative, il envisageaient le pattern 90° comme nécessitant le plus d'effort pour être maintenu tant ce pattern était difficile à percevoir. Or, comme le démontrent nos

résultats de difficulté perçue, le niveau d'effort investi pour la réalisation motrice et la stabilisation des patterns “ en compétition ” ne dépendrait pas seulement des contraintes perceptives de la phase relative exigée, mais également du niveau de contraintes issues des propriétés intrinsèques du système (tout particulièrement celles du pattern en phase).

Pour terminer, au vu de nos résultats, la difficulté perçue semble être un outil pertinent d'évaluation de l'effort investi par les sujets lors de la réalisation de la tâche bimanuelle. Mais des confirmations expérimentales sont nécessaires, et tout particulièrement en évitant l'influence additive d'informations comportementales qui ne sont pas sans poser problème dans l'interprétation des résultats. Qui plus est, la mesure ponctuelle ne rend pas compte de la dynamique de l'investissement intentionnel, d'où l'intérêt d'une évaluation quantitative du paramètre c_{int} . Ceci permettrait d'étudier la nature des relations entre (1) la difficulté perçue et ce paramètre c_{int} , et (2) la dynamique de la stabilité et la dynamique de l'effort. Dès lors, les différences individuelles pourront être appréhendées, comme par exemple la capacité du sujet à investir et maintenir un fort niveau d'effort (Scholz et Kelso, p. 120).

3-5 Conclusion

Le but de cette étude était de rendre compte du réel rôle d'une information comportementale intentionnelle (Schöner & Kelso, 1988a), et tout particulièrement de définir l'influence de l'effort, composante intensive des intentions (c_{int}), sur la réalisation des coordinations motrices de la tâche bimanuelle. Pour ce faire, l'analyse des distributions de probabilité, nécessaire pour mettre l'accent sur le caractère imprévisible d'un système complexe, est apparue comme un outil pertinent pour estimer l'impact des contraintes motivationnelles sur la dynamique générale des coordinations motrices. Tout d'abord, il a été démontré que la composante directionnelle d'une contrainte intentionnelle (ψ_{int}) modifiait la dynamique intrinsèque du système, bien que cette dernière continuait à contraindre le comportement résultant (Scholz et Kelso, 1990). Par exemple, nous avons montré que maintenir le plus longtemps possible une intention sur le pattern en anti-phase permettait de retarder le processus de transition de phase (cf. étude 1, p. 53).

Mais les diverses études traitant de l'influence des contraintes intentionnelles sur la dynamique des coordinations bimanuelles ne s'étaient jamais intéressées spécifiquement au caractère intensif de l'information intentionnel, c_{int} . Pourtant, les illustrations de la dynamique de la fonction de potentiel où une information comportementale était modélisée (voir par exemple Kelso & DeGuzman, 1988, p. 183; Scholz & Kelso, p. 103-105) impliquaient inévitablement la simulation des valeurs de c_{inf} afin d'obtenir un minimum sur le pattern requis, ψ_{inf} . En ce qui concerne la contrainte intentionnelle, toute simulation montrait l'importance de l'effort investi sur la stabilité du système. Donc en manipulant le niveau de l'investissement intentionnel avec différentes instructions, nos résultats expérimentaux indiquait clairement que la variabilité du pattern en anti-phase est significativement diminuée, même à hautes fréquences d'oscillation, dès lors qu'il était demandé aux sujets de mobiliser et de maintenir le maximum d'effort (cf. étude 2, p. 71).

Mais un des points les plus intéressants a été le lien direct entre les données de stabilité et les valeurs calculées de c_{int} . Premièrement, cette relation validait notre protocole, et tout spécialement la pertinence des instructions prescrites aux sujets afin d'induire des niveaux d'effort différents. En effet, l'investissement intentionnel était quantitativement plus important lorsque les sujets étaient soumis à l'instruction "intention augmentée". Deuxièmement, ces différences significatives attendues étaient liées aux différences de stabilité du pattern en anti-phase. Mais elles n'ont été seulement observées qu'en situations de compétition, à savoir lors de la réalisation du pattern en anti-phase à fréquences sur-critiques ($F4 = Fc + 0.25\text{Hz}$ et $F5 = Fc + 0.5\text{Hz}$).

Ainsi les tâches de compétition peuvent être fortement contraintes par un investissement d'effort, ce qui n'est pas sans conséquence tant au niveau de l'apprentissage ou du contrôle des coordinations motrices. L'influence d'une contrainte intentionnelle spécifique semble donc positive sur la qualité des coordinations motrices.

4- Influence de l'activation sur le phénomène de transition de phase et la stabilité des coordinations bimanuelles

4-1 Introduction

Si des contraintes spécifiques telles que les intentions, les motivations ou encore les attentes du sujet permettent de modifier qualitativement et quantitativement les coordinations motrices d'un système complexe, force est de constater que ce dernier est susceptible d'être également influencé par les contraintes liées à la tâche, à l'environnement et l'organisme du sujet (Newell, 1986). Le sujet doit alors s'accommoder de l'influence de son état énergétique et émotionnel qui découle de ces contraintes, afin d'optimiser sa performance motrice (Jones & Hardy, 1989).

Conceptualisé sous différents termes tels que l'activation, l'éveil, le stress ou encore l'anxiété, l'état interne du sujet renvoie classiquement au degré d'activité de l'organisme, selon un continuum partant d'une extrême somnolence jusqu'à des excitations extrêmes, en passant par la veille attentive et les émotions (Humphreys & Revelle, 1984; Lindsley, 1960; Malmö, 1959). Longtemps considérée comme un concept unitaire (Duffy, 1957), l'activation représente la dimension intensive, énergétique du comportement. Ainsi l'objectif de cette présente étude est d'appréhender l'effet de l'activation énergétique, induite par un exercice physique, sur la qualité des coordinations motrices, dans le cadre des modèles dynamiques non linéaires.

La relation entre la dimension énergétique de l'organisme et la performance a été traditionnellement interprétée selon la théorie curvilinéaire issue des travaux de Yerkes et Dodson (1908)²³. Selon ce modèle en U inversé, il était postulé que la performance s'améliorait avec l'augmentation de l'activation jusqu'à un seuil à partir duquel toute élévation de l'activation entraînait une baisse de la performance. Mais le caractère unidimensionnel de l'activation sur lequel reposait cette relation et la difficulté d'identifier des paramètres physiologiques qui rendent compte d'un niveau d'activation (Lacey, 1967; Martens, 1976) ont été largement critiqués (e.g., Hockey & Hamilton, 1983). Dès lors, la relation activation / performance a été repositionnée dans

²³ Ils observèrent que des chocs électriques légers délivrés après des réponses incorrectes accélèrent un apprentissage discriminatif chez la souris, mais que des chocs plus intenses le ralentissaient.

une approche plus complexe, multidimensionnelle (Humphreys & Revelle, 1984; Jones & Hardy, 1989; Sanders, 1983).

Tout comme le suggérait Näätänen (1973) dans sa critique de la relation en U-inversé entre la performance et l'activation, plusieurs modèles distinguent deux dimensions du comportement, l'une *cognitive* et l'autre *somatique* (Jones & Hardy, 1989; Humphreys & Revelle, 1984). Sans entrer dans les détails, retenons que le versant cognitif est caractérisé par des attentes pessimistes, quant au succès, des images d'échecs et un manque de concentration alors que le versant somatique se réfère aux symptômes physiques tels que la nervosité et la tension (Jones & Hardy, 1989, p. 47). En d'autres termes, la dimension somatique de l'état interne du sujet renvoie à la dimension physiologique, exprimant l'activation, et que l'on peut identifier au travers d'indicateurs tels que la fréquence cardiaque, le rythme respiratoire, la tension musculaire ou autres réactions végétatives.

Dans le modèle cognitivo-énergétique de Sanders (1983), ce versant somatique de l'état interne du sujet est représenté par deux réservoirs énergétiques, l'éveil (*arousal*) et l'activation, dont leur niveau aurait des influences sélectives sur les étapes du système de traitement de l'information. En outre, un troisième réservoir, dénommé effort, "est supposé coordonner, moduler l'activité de l'éveil et de l'activation" (Sanders, 1983, p. 77). Ce mécanisme d'effort aurait pour rôle de corriger tout déséquilibre entre les mécanismes d'éveil et d'activation dans le but de produire une performance maximale. Mais ce qui est également important de relever est que ce mécanisme d'effort est dépendant d'un mécanisme d'évaluation (*evaluation mechanism*). Son fonctionnement résulte d'une part de l'évaluation du versant *somatique* du système (ce qui peut déclencher l'action de l'effort dans le cas de déséquilibre entre l'éveil et l'activation) et d'autre part de l'évaluation *cognitive* de la performance de la part du sujet.

Ceci rejoint les idées émises par Martens *et al.* (1990). En effet, leur modèle, s'articulant autour du concept d'anxiété pour rendre des effets de l'état interne du sujet sur la performance, suggère que l'activation ne renvoie qu'à la dimension intensive du comportement, alors que l'anxiété cognitive et somatique comprennent toujours une composante directionnelle. Ainsi l'anxiété peut entraîner une élévation d'activation au

niveau somatique, mais cette dernière peut également être influencée par d'autres facteurs tels que les drogues (la caféine, Revelle, Humphreys, Simon & Gilliland, 1980; les amphétamines, Frowein, 1981), la température extérieure (Provins *et al.*, 1973; Delignières, 1995), le manque de sommeil (Wilkinson, 1961; 1963), le bruit (Broadbent, 1957, Dornic *et al.*, 1974; Dornic & Ferneaus, 1981; Hancock, 1984) ou encore la dépense énergétique (Davey, 1973; Delignières, Brisswalter & Legros, 1994; Fleury, Bard, Jobin & Carrière, 1981).

Mais la plupart de ces études démontrent clairement l'interaction des effets de l'état motivationnel du sujet et des effets du niveau d'activation de l'organisme. Par exemple, Delignières *et al.* (1994) ont testé l'effet de différents niveaux d'activation induits par une tâche de pédalage sur cyclo-ergomètre sur la performance d'une tâche de temps de réaction de choix, et ce chez deux populations, l'une dite experte dans les prises de décision, l'autre non-experte. Leurs résultats montraient que l'augmentation du niveau d'activation entraînait une amélioration du temps de réaction chez les experts, alors que les non-experts présentaient des performances détériorées. Mais les scores de difficulté perçue indiquaient significativement que les experts allouaient en règle générale davantage de ressources. Ainsi l'amélioration de la performance à de forts niveaux d'activation peut s'expliquer par une augmentation de la quantité de ressources investies par le sujet dans la tâche (Paas & Adam, 1991).

A ce niveau, on peut également rappeler les études de Dornic *et al.* (1974) ou de Wilkinson (1961) qui montrent respectivement que les effets de l'activation induits par différents niveaux de bruit ou par une privation de sommeil sur la performance peuvent être contrecarrés par une modification volontaire ou provoquée (i.e. sous formes d'encouragements par exemple) de l'état motivationnel du sujet. Ce point est méthodologiquement essentiel dans l'étude de l'effet spécifique de l'activation "énergétique" sur les coordinations motrices. En effet, comme le soulignent Näätänen (1973) ou Mandler (1975), une augmentation du niveau d'activation s'accompagne d'une augmentation du bruit interne, résultat de la mise en jeu de différents processus physiologiques (système nerveux sympathique, fonction endocrine...). En termes dynamiques, ce bruit exprimerait une non-linéarité grandissante dans le système, due aux interactions des sous-systèmes, influençant par définition la dynamique des coordinations bimanuelles. Puisque Mandler (1975) soutient que la dégradation de la

performance à haut niveau d'activation est le résultat de l'augmentation parallèle de "l'activité des sous-système", facteur de distraction du niveau de ressources allouées à la tâche, il peut être fortement suggéré que l'activation ait pour effet de contraindre qualitativement et quantitativement le dynamique des coordinations motrices.

Dans le cadre de l'approche dynamique, très peu de travaux se sont intéressés à l'effet de l'activation sur les coordinations motrices. On peut cependant relever deux études à partir desquelles émergent quelques réflexions hypothétiques. La première concerne l'analyse de la relation activation / performance motrice chez des enfants réalisant une tâche de franchissement d'obstacles (Beuter & Duda, 1985). Pour rendre compte de l'évolution de l'organisation spatio-temporelle des membres impliqués dans cette tâche, les auteurs ont analysé les positions et les vitesses des angles articulaires et ont comparé les diverses interactions inter-articulaires. S'appuyant sur les travaux de Soechting et Lacquaniti (1981) ou de Lacquaniti et Soechting (1982), qui démontraient que les coordinations résultantes des articulations proximales sont plus stables que les articulations distales, Beuter et Duda (1985) pensèrent qu'un haut niveau d'activation affecterait les variables cinématiques mesurées au niveau de l'articulation intrinsèquement la plus instable (la cheville). Leurs résultats leur donnaient raison, en expliquant que « la modification des profils cinématiques de la cheville était due à l'action de la contrainte d'activation » (p. 239). Ce résultat laisse sous-entendre que les coordinations intrinsèquement les plus instables sont les plus susceptibles aux perturbations induites par une contrainte d'activation, considérée alors comme un paramètre de contrôle altérant la dynamique du système.

Dans cette perspective, l'étude de Court *et al.* (1998) a porté sur l'influence d'une contrainte émotionnelle sur le phénomène de transition de phase de la tâche bimanuelle. Leurs résultats ont tendance à montrer que des sujets anxieux, placés dans un climat compétitif, présentaient des fréquences critiques plus faibles que celles observées dans un environnement "normal". Ce résultat semble cohérent avec l'hypothèse selon laquelle l'activation accroît l'influence du bruit dans le système, se traduisant par une transition plus précoce du comportement hors du bassin d'attraction du pattern en anti-phase.

Ainsi l'objectif de notre étude est d'étudier l'effet de l'activation préalablement induite par un exercice physique sur (1) le processus de transition de phase et (2) sur la stabilité des deux patterns de coordination spontanés à la tâche bimanuelle. On se propose alors de vérifier les hypothèses suivantes :

(1) concernant l'étude sur la transition de phase :

- Les valeurs des fréquences critiques observées à la suite d'un exercice physique sont significativement plus faibles que celles mesurées en condition de repos.
- La variabilité pré-transition du pattern en anti-phase déterminée dans la condition exercice physique est plus importante que la variabilité mesurée dans la condition de repos, et ceci pour une même fréquence d'oscillation.

(2) concernant l'étude sur la stabilité du pattern en phase et en anti-phase :

- Le niveau de fluctuations de la phase relative mesuré à la suite d'un exercice physique est significativement plus important que celui estimé en condition de repos.

4-2 Méthode

4-2-1 Sujets

Tout d'abord six sujets (24.83 ± 1.47) ont spécifiquement participé à l'étude de l'effet de l'activation sur le processus de transition de phase. Ensuite, pour tester l'influence d'un exercice physique sur la stabilité des 2 attracteurs de la tâche bimanuelle, six nouveaux sujets (22.66 ± 0.51) ont été recrutés. Aucun des sujets n'était familier avec la tâche de coordinations bimanuelles.

4-2-2 Appareillage

A la suite de deux conditions " d'activité ", soit de repos (CR), soit d'exercice physique (CE), la tâche consistait en la réalisation de mouvements continus selon les modes de coordination en phase ou en anti-phase. Le dispositif expérimental de la tâche bimanuelle restait identique aux études précédemment exposées (cf. point 1-2-2, p. 58). Lors des sessions expérimentales, un tapis roulant *Care* de modèle *Powerfit 3001* était utilisé dans la condition exercice physique. De plus, quelle que soit la condition

d'activité, la fréquence cardiaque du sujet était enregistrée au moyen de cardio-fréquencesmètres de type Polar Accurex Plus.

4-2-3 Procédure

Tous les sujets ont participé à trois sessions expérimentales, séparées par au moins un jour de repos. Le protocole adopté lors de la 2^{ème} et 3^{ème} session se différenciait selon les deux hypothèses testées.

4-2-3-1 Première session

Pour se familiariser avec la tâche bimanuelle, tous les sujets réalisaient tout d'abord 4 essais en phase et 4 essais en anti-phase d'une minute chacun, à fréquence d'oscillation d'1Hz. Les sujets recevaient les mêmes consignes que lors de la première étude (cf. point 1-2-3-1, p. 59). A la suite de ces 8 essais, les sujets réalisaient successivement 4 essais au cours desquels la fréquence d'oscillation était régulièrement augmentée de 0.02Hz à chaque cycle de mouvement, répliquant ainsi le protocole suivi lors de la première étude (cf. point 1-2-3-2, p. 59). A ce niveau, on peut juste rappeler qu'il était demandé aux sujets de ne pas résister à la transition de phase et de se caler sur le mode de coordination qu'il leur semblait le plus confortable pour pouvoir continuer à suivre la fréquence imposée. Quelques secondes après l'apparition de la transition de phase, l'expérimentateur indiquait la fin de l'essai par l'arrêt du signal sonore.

La médiane de ces 4 fréquences critiques (F_c) observées servait de référence de fréquence relative de "travail" pour les 6 sujets impliqués dans l'étude sur la stabilité des attracteurs, au cours deux sessions suivantes, à savoir $F_c - 0.5$ Hz.

Les sujets étaient ensuite soumis au test navette de Léger-Mercier permettant d'évaluer la vitesse maximale aérobie du sujet (Léger & Gadoury, 1989; Léger, Mercier, Gadoury & Lambert, 1988). Ce test consistait à réaliser le plus d'allers et retours sur une distance de 20 mètres. Le changement de direction du sujet devait correspondre à un signal sonore dictant le rythme de course. L'intervalle temporel entre deux signaux sonores était progressivement diminué. Ainsi la vitesse de course pour laquelle le sujet ne pouvait plus compléter les vingt mètres requis dans l'intervalle

temporel était considérée comme sa vitesse maximale aérobie. La fréquence cardiaque était enregistrée en continue pendant toute la durée du test.

4-2-3-2 Sessions expérimentales

4-2-3-2-1 Hypothèses sur la transition de phase

La session 2 et 3, suivant le même décours temporel, se différençait selon la condition d'activité testée, dont l'ordre était contrebalancé entre les sujets. Dans la condition exercice physique, les sujets commençaient par 5 minutes de course sur le tapis roulant à 8 km.h⁻¹. Après un retour à une fréquence cardiaque de repos, les sujets devaient courir pendant 10 minutes à 60% de la vitesse maximale aérobie (VMA) estimée lors du test Léger-Mercier. Immédiatement après la fin de cette activité physique, 4 essais d'évaluation de la fréquence critique (protocole identique que lors de la première session, à savoir incrémentation de la fréquence de 0.02Hz à chaque cycle de mouvement) leur étaient administrés. A la suite de chaque essai, il était demandé au sujet d'en évaluer sa difficulté grâce à l'échelle de difficulté perçue DP-15 (Delignières *et al.*, 1994). Cette estimation avait pour but de se protéger des biais expérimentaux induits par des niveaux d'investissement des ressources différents selon les conditions testées. Puisque cette "perception de la difficulté est basée sur le niveau d'investissement en ressources du sujet lors de la réalisation de la tâche" (Delignières, 1993a), on se doit de s'assurer du même niveau d'allocation des ressources de la part des sujets selon les conditions testées (CR et CE). En effet, comme le suggèrent les différents modèles de Sanders (1983) ou de Humphreys et Revelle (1984) et les différentes études expérimentales (Delignières *et al.*, 1994; Dornic *et al.*, 1974), les éventuels effets liés à la manipulation de l'activation peuvent être contrecarrés par un niveau d'effort significativement différent selon les conditions testées.

Dans la condition de repos, les sujets étaient soumis aux mêmes conditions d'essais de la tâche bimanuelle, à savoir 4 essais d'évaluation de la fréquence critique. De la même façon, une évaluation de la difficulté de l'essai était demandée aux sujets.

4-2-3-2-2 Hypothèses sur la stabilité des patterns spontanés

Les six sujets concernés ont également été soumis aux deux conditions d'activité, mais le protocole proposé avait pour but de ne tester que l'effet de l'exercice physique sur le niveau de fluctuations des deux patterns intrinsèques de la tâche bimanuelle. Pour la condition exercice physique, les sujets commençaient par se familiariser avec le tapis roulant par 5 minutes de course à 8 km.h^{-1} . Après un retour à une fréquence cardiaque de repos, un exercice de 10 minutes de course à 60% de la VMA du sujet était effectué sur le tapis roulant, immédiatement suivi par la réalisation d'un essai soit en phase, soit en anti-phase. La fréquence relative d'oscillation ($F_c - 0.5\text{Hz}$) restait constante au cours des quatre minutes d'essai.

Après une période de récupération, les sujets recourraient pendant 10 minutes à même intensité d'exercice. Suivant la même logique, une fois l'exercice terminé, un nouvel essai de 4 minutes de la tâche bimanuelle était réalisé par les sujets selon le mode de coordination non testé à la suite du premier exercice.

Dans la condition de repos, les sujets suivaient exactement le même protocole, excepté bien entendu la réalisation des exercices physiques. Le décours temporel était respecté, à savoir 10 minutes de repos entre la réalisation des deux patterns de coordination de la tâche bimanuelle.

L'ordre des conditions d'activité et de réalisation du pattern en phase ou en anti-phase était contrebalancé entre les sujets. En outre, à la suite de chaque essai de la tâche bimanuelle, les scores de difficulté perçue ont également été enregistrés.

4-2-3-3 Analyses des données et traitements statistiques

4-2-3-3-1 Hypothèses sur la transition de phase

Les deux principales variables dépendantes, la fréquence critique et le niveau de fluctuations des patterns intrinsèques, ont été déterminées sur la base du calcul de la phase relative (ϕ) selon la même procédure que les études précédentes (cf. point 1-2-3-4, p. 60). Tout d'abord, pour chaque sujet et chaque essai, que ce soit lors de la 1^{ère} session, lors de la condition exercice physique ou de la condition repos, les fréquences

critiques ont été relevées, puis soumise à une ANOVA à mesures répétées 3 (conditions) × 4 (essais).

Pour tester l'effet de l'activation sur le niveau de stabilité pré-transition du pattern en anti-phase, la variabilité de ϕ a été calculée sur 4 intervalles précédant la transition T : $I_1 = [T ; T - 2s]$, $I_2 = [T - 2s ; T - 3s]$, $I_3 = [T - 3s ; T - 5s]$ et $I_4 = [T - 5s ; T - 10s]$. Deux traitements ont alors été effectués, à savoir l'analyse de la variabilité de ϕ calculée sur les 4 intervalles (1) à fréquence identique pour tous les essais d'un même sujet, et (2) à fréquence relative (cf. point 1-2-3-4, p. 60). Pour chaque analyse, une ANOVA à mesures répétées 3 (conditions) × 4 (essais) × 4 (intervalles) a été réalisée.

Deux autres variables dépendantes ont été analysées par une même ANOVA à mesures répétées 2 (conditions) × 4 (essais) : la valeur moyenne de la fréquence cardiaque relevée lors de la réalisation de l'essai de la tâche bimanuelle et les scores de difficulté perçue.

4-2-3-3-2 Hypothèses sur la stabilité des patterns spontanés

Une seule analyse a été réalisée avec la variabilité de la phase relative comme variable dépendante. L'échelle d'observation de cette variabilité a été de 29 secondes, définissant huit intervalles de temps sur l'ensemble d'un essai : $I_1 = [2s - 31s]$; $I_2 = [31s - 60s]$; $I_3 = [60s - 89s]$; $I_4 = [89s - 118s]$; $I_5 = [118s - 147s]$; $I_6 = [147s - 176s]$; $I_7 = [176s - 205s]$; $I_8 = [205s - 234s]$. Ainsi cette variable dépendante a été soumise à une ANOVA à mesures répétées 2 (coordination) × 2 (condition) × 8 (intervalle).

De la même façon, la valeur moyenne de la fréquence cardiaque relevée lors de la réalisation de la tâche bimanuelle et les scores de difficulté perçue ont été soumises à une ANOVA à mesures répétées 2 (coordination) × 2 (condition).

Pour chaque analyse, le seuil de significativité a été fixé à $p < 0.05$ et des tests post-hoc de type Tukey HSD ont été réalisés le cas échéant.

4-3 Résultats

4-3-1 Effets de l'exercice physique sur la transition de phase

4-3-1-1 Fréquence cardiaque et difficulté perçue

L'analyse des valeurs moyennes de la fréquence cardiaque relevées au cours de la réalisation d'un essai a révélé uniquement un effet du facteur condition ($F_{1,5} = 33.572$; $p < 0.05$), indiquant que l'état des sujets était significativement différent entre la condition exercice physique (moy : 142 bpm) et la condition de repos (moy : 103 bpm). En second lieu, aucun effet n'a été observé lors de l'analyse des scores de difficulté perçue. Le niveau d'investissement intentionnel des sujets restait identique quelle que soit la condition.

4-3-1-2 Fréquence critique

En ce qui concerne l'analyse des fréquences critiques des sujets, les résultats ont montré un effet du facteur condition ($F_{2,10} = 4.119$; $p < 0.05$) : les post-hoc indiquaient que les fréquences critiques étaient significativement inférieures en condition exercice physique que celles estimées en condition de repos ($p < 0.05$) (figure 14).

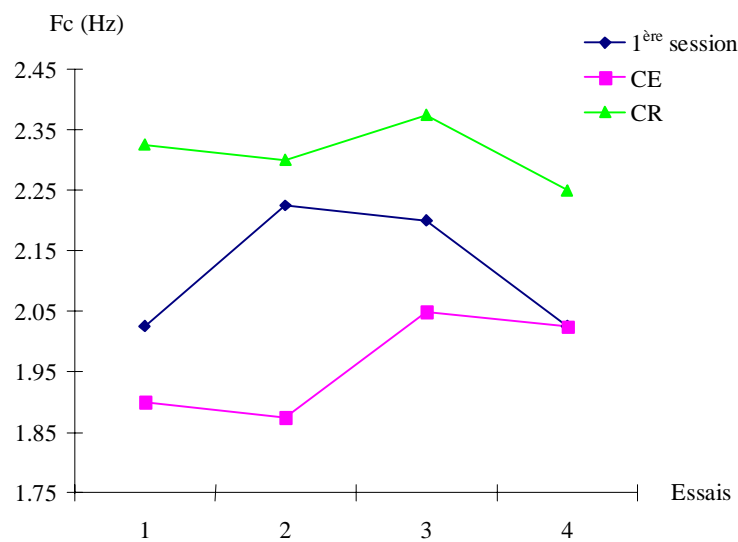


Figure 14 : Evolution des fréquences critiques en fonction des essais et des conditions de passation, à savoir lors de la 1^{ère} session, en condition d'exercice physique (CE) ou en condition de repos (CR).

4-3-1-3 Variabilité pré-transition à même fréquence

L'ANOVA a indiqué un effet principal du facteur intervalle ($F_{3,15} = 40.358$, $p < 0.001$) localisé entre I_1 (i.e. = $[T ; T - 2s]$) et les trois autres intervalles. De plus, une interaction condition \times intervalle ($F_{6,30} = 2.434$, $p < 0.05$) a également été observée, marquant une différence entre la condition exercice physique et le condition de repos sur l'intervalle I_1 ($p < 0.01$) (figure 15).

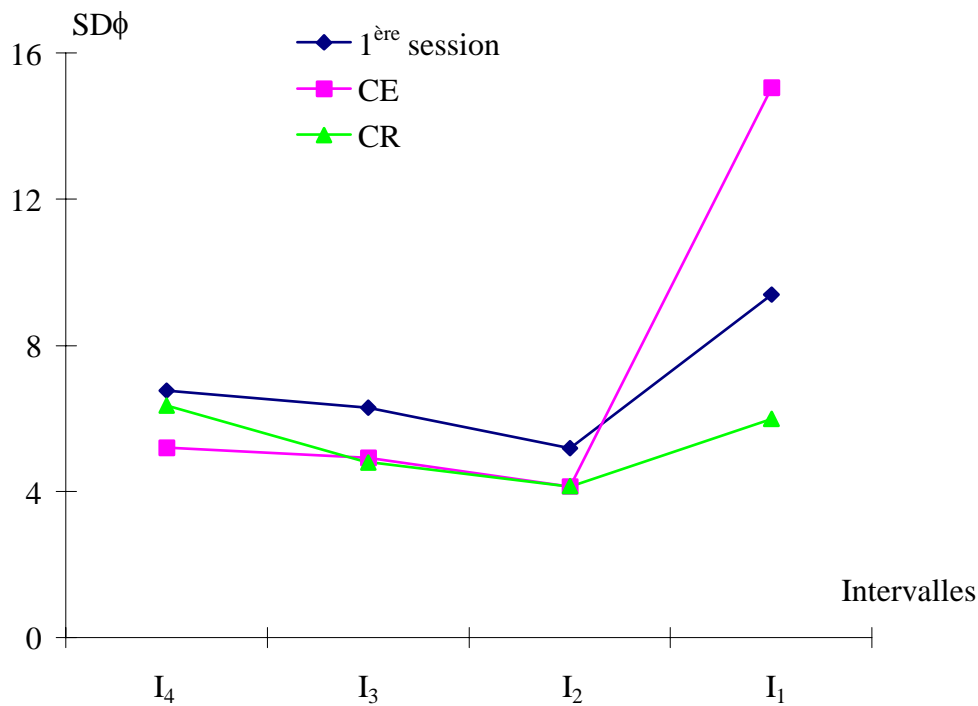


Figure 15 : Evolution de la variabilité pré-transition de la phase relative, ϕ , en fonction des intervalles considérés ($I_1 = [T ; T - 2s]$, $I_2 = [T - 2s ; T - 3s]$, $I_3 = [T - 3s ; T - 5s]$ et $I_4 = [T - 5s ; T - 10s]$), lors des essais réalisés lors de la 1^{ère} session, dans la condition exercice physique (CE) et dans la condition de repos (CR).

4-3-1-4 Variabilité pré-transition à fréquence relative

L'analyse de la variabilité pré-transition du pattern en anti-phase a seulement montré un effet principal du facteur intervalle ($F_{3,15} = 190.234$, $p < 0.001$), une nouvelle fois localisé entre I_1 (= $[T ; T - 2s]$) et les trois autres intervalles ($p < 0.001$).

4-3-2 Effets de l'exercice physique sur la stabilité des attracteurs

4-3-2-1 Fréquence cardiaque et difficulté perçue

En ce qui concerne les fréquences cardiaques moyennes, il n'a été observé qu'un effet du facteur condition ($F_{1,5} = 81.762$; $p < 0.001$), indiquant des valeurs moyennes significativement plus importantes en condition exercice physique qu'en condition de repos.

L'ANOVA a révélé un effet du facteur coordination ($F_{1,5} = 10.547$; $p < 0.05$) et du facteur condition ($F_{1,5} = 35.243$; $p < 0.01$). En règle générale, la perception de la difficulté augmentait sous la condition exercice physique, mais cet effet n'affectait pas la différence d'investissement intentionnel entre les deux patterns intrinsèques, significativement moins important pour la réalisation du pattern en phase (Figure 16).

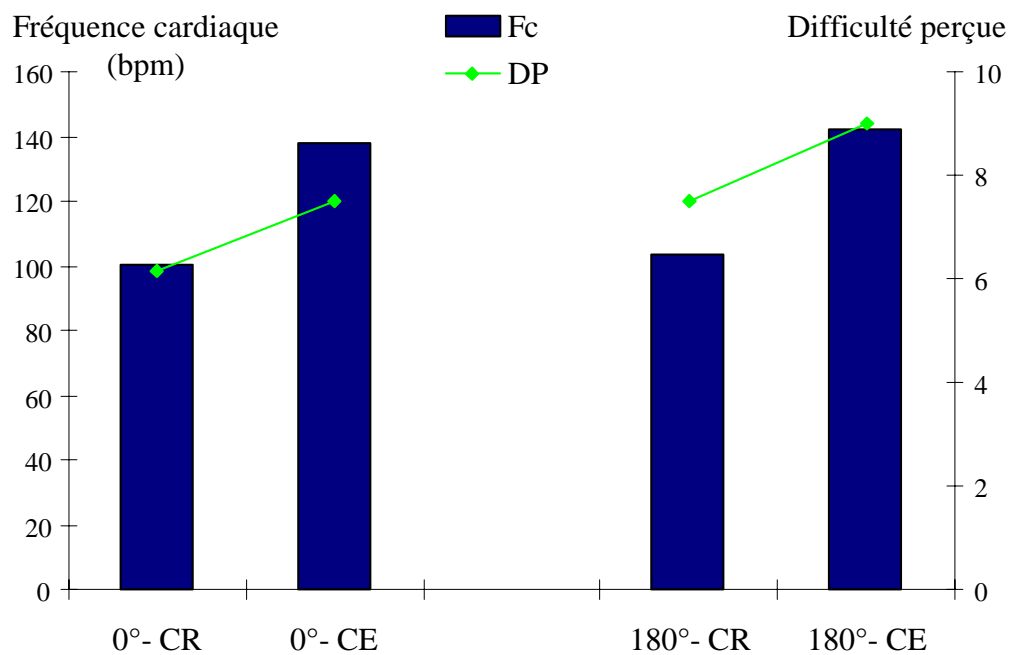


Figure 16 : Représentation des valeurs moyennes de la fréquence cardiaque et de la difficulté perçue (DP) relevées lors de la réalisation du pattern en phase (0°) et en anti-phase (180°) en fonction de la condition testée (CR : condition de repos; CE : condition exercice physique).

4-3-2-2 Variabilité de la phase relative

L'ANOVA de la variabilité des patterns en phase et en anti-phase a indiqué un effet du facteur intervalle ($F_{7,35} = 5.064$; $p < 0.001$). La figure 17 montre que le niveau de fluctuations de la phase relative tend à augmenter avec le temps de réalisation, quels que soient les patterns et les conditions testés. Les tests post-hoc ont indiqué que cette différence de stabilité est significativement différente entre la 1^{ère} et 4^{ème} minute de réalisation ($p < 0.05$).

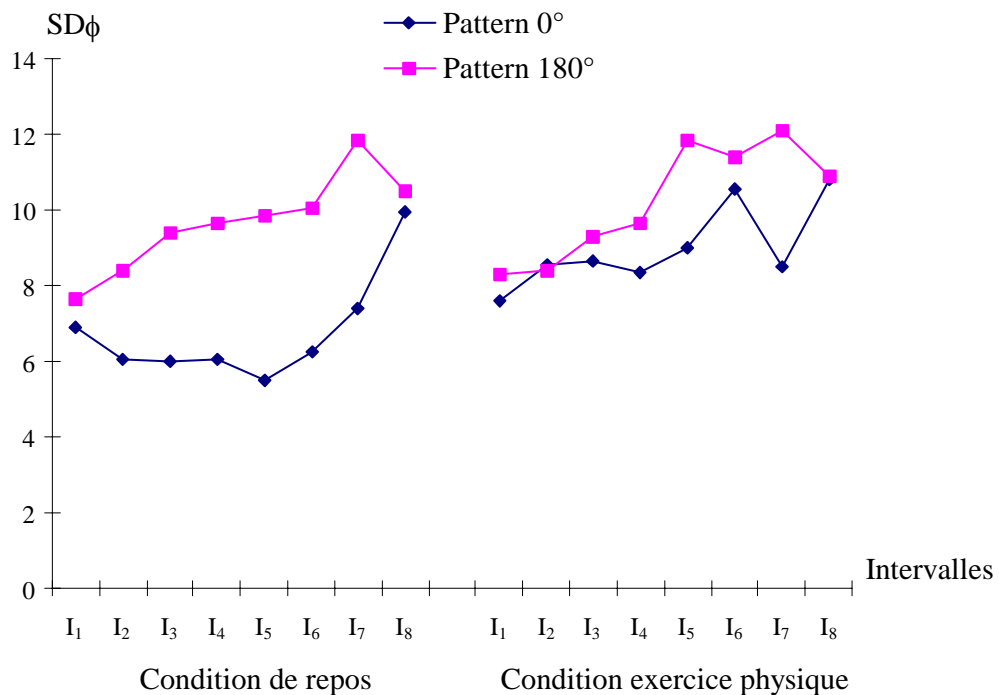


Figure 17 : Evolution de la variabilité de la phase relative en fonction des 8 intervalles considérés ($I_1 = [2s - 31s]$; $I_2 = [31s - 60s]$; $I_3 = [60s - 89s]$; $I_4 = [89s - 118s]$; $I_5 = [118s - 147s]$; $I_6 = [147s - 176s]$; $I_7 = [176s - 205s]$; $I_8 = [205s - 234s]$), pour le pattern 0° et 180° et les deux conditions d'activité testées.

4-4 Discussion

4-4-1 Aspects méthodologiques

L'objet de cette expérimentation était d'évaluer l'impact de l'activation, induite par un exercice physique, sur les dimensions qualitative et quantitative des coordinations motrices de la tâche bimanuelle, en s'intéressant directement à la dynamique du paramètre d'ordre susceptible de rendre compte du comportement dans son ensemble. Ceci nous permet de dépasser la grande variabilité des résultats et les

problèmes méthodologiques rencontrés dans les études de l'effet d'un exercice physique sur les diverses opérations cognitives sollicitées au cours des différentes étapes du système de traitement de l'information (Arcelin & Brisswalter, 2000; Arcelin, Delignières & Brisswalter, 1998; Brisswalter & Legros, 1996).

Mais au-delà de l'inconsistance des méthodologies utilisées, plusieurs contraintes, susceptibles d'influencer le comportement moteur, semblent nécessaires à contrôler : le niveau d'expertise des sujets dans la tâche motrice testée, l'intensité et la difficulté de la sollicitation physiologique et l'état motivationnel du sujet (cf. Tomporowski & Ellis, 1986). En termes dynamiques, la première contrainte, le niveau d'expertise, exprime l'influence des caractéristiques intrinsèques des coordinations du système (Delignières *et al.*, 1998). Ceci signifie que les coordinations motrices seront d'autant moins déstabilisées par un effet attendu d'une activation physiologique que le potentiel d'attraction du pattern de coordination requis sera important. Le rôle prédominant du niveau de stabilité (spontané ou après apprentissage) sur le comportement résultant serait fonction du niveau d'expertise du sujet dans la tâche de coordination testée. Dans ce cadre, le choix de sujets novices nous a permis d'annihiler l'influence de cette contrainte d'expertise.

Notre second souci a été de standardiser la contrainte d'activation liée à l'exercice physique proposé. Puisque le niveau de condition physique des sujets semble être une contrainte susceptible de moduler l'influence de l'activation sur les réponses motrices (Brisswalter, Legros & Delignières, 1994; Delignières *et al.*, 1994), il est essentiel de réaliser une épreuve préliminaire d'évaluation du niveau de condition physique des sujets et de définir des intensités d'exercice physique relatives à chacun. Ainsi la réalisation du test Léger-Mercier a permis l'évaluation de la vitesse maximale aérobie (VMA) des sujets et de tester l'effet d'une activation physiologique induite par une épreuve de course sur tapis roulant à 60% de la VMA du sujet. La lecture des patterns de résultats des fréquences cardiaques moyennes relevées lors de la réalisation de la tâche bimanuelle confirme que les deux conditions d'activation testées (condition exercice physique versus condition de repos) induisaient des états différents de sollicitation physique pour le sujet (cf. Beuter et Duda, 1985).

Cependant, le choix d'une intensité de 60% de la VMA estimée n'a peut-être pas induit l'augmentation attendue du bruit interne due à l'activation des différents processus physiologiques (Mandler, 1975). Ceci peut constituer la première explication possible du peu d'effets de la contrainte d'activation sur *la stabilité* des coordinations intrinsèques de la tâche bimanuelle. Bien que les sujets aient été placés dans des états différents selon les deux conditions d'activité, l'augmentation de ce bruit interne, représentatif d'une non-linéarité différente dans le système, ne modifierait pas l'influence dynamique des forces stochastiques sur les coordinations bimanuelles. Lorsque les conditions de réalisation de ces dernières sont stables (fréquence d'oscillation constante au cours de l'essai), leur niveau de stabilité intrinsèque serait alors prédominant sur la dynamique résultante.

Le troisième contrainte que nous nous sommes efforcés d'appréhender est l'état motivationnel du sujet. Comme nous l'avons spécifiquement démontré (cf. études 1, 2 et 3), le niveau d'investissement des ressources du sujet influence la dynamique des coordinations motrices. En conséquence, l'évaluation de la perception de la difficulté de la tâche proposée nous a paru essentielle dans l'étude de l'effet de l'activation sur la dynamique du système. Dans ce cadre, l'interprétation d'une influence de cette contrainte d'activation semble valide au regard des résultats des scores de la difficulté perçue. En effet, aucune différence d'allocation de ressources n'a été observée chez les sujets lors des essais à incrémentation progressive de la fréquence d'oscillation, quelles que soient les différentes conditions testées (CE ou CR).

En revanche, chez les sujets impliqués dans l'hypothèse de stabilité des patterns intrinsèques, un investissement intentionnel significativement plus important a été relevé lors de la réalisation du pattern en anti-phase. Ceci semble confirmer l'influence du niveau intrinsèque de stabilité du pattern requis sur le niveau d'effort investi par les sujets (Deschamps *et al.*, 2000). On peut également relever un investissement intentionnel plus important de la part de ces sujets lorsqu'ils ont réalisé la tâche bimanuelle à la suite de la condition exercice physique. Cette différence peut expliquer pourquoi aucun effet de la contrainte d'activation sur la stabilité des patterns de coordinations n'a été observé. Conformément aux hypothèses de Sanders (1983), l'effort permettrait de moduler et d'ajuster le niveau d'activation du sujet à un niveau optimal synonyme de performance optimale.

4-4-2 Interprétation des résultats

Confirmant notre première hypothèse, les fréquences critiques estimées à la suite d'un exercice physique sont significativement inférieures à celles observées dans la condition de repos. Dans un protocole d'incrémentation continue de la fréquence d'oscillation, la contrainte d'activation module la dynamique des modifications qualitatives du comportement moteur. Ceci signifie que le potentiel d'attraction du pattern en anti-phase est plus rapidement déformé, rendant plus précoce l'influence des forces stochastiques sur le processus de transition de phase.

Contrairement à notre seconde hypothèse, l'apparition plus précoce de la transition de phase dans la condition exercice physique ne s'est pas traduite par une augmentation plus importante du niveau d'instabilité pré-transition du pattern en anti-phase, que ce soit dans l'analyse à fréquence identique ou à fréquence relative (cf. points 4-3-1-3 et 4-3-1-4, p. 127). Bien qu'une différence significative de la variabilité du pattern en anti-phase entre les deux conditions testées ait *seulement* été révélée sur les 2 dernières secondes d'observation dans l'analyse à fréquence identique, elle est difficilement imputable à l'effet de l'activation. En effet, la fréquence de référence (i.e. la fréquence critique la plus faible du sujet) a été majoritairement observée au cours d'un essai sous la condition exercice physique. Dans ce cadre, comme le montrent les mesures des *fluctuations critiques* ou du *ralentissement critique*, il est difficile d'affirmer que la contrainte d'activation a pour effet de perturber progressivement le niveau de stabilité des coordinations bimanuelles. L'influence de l'activation semble modifier la dynamique du système de façon soudaine et brutale. Cette hypothèse peut constituer une explication possible du peu d'effet de la contrainte d'activation sur la stabilité des coordinations intrinsèques de la tâche bimanuelle.

L'analyse de la variabilité de la phase relative ne montre aucun effet de l'activation sur le niveau de stabilité du pattern en phase et en anti-phase. Ce résultat ne confirme pas nos hypothèses : aucun effet négatif de l'activation sur la stabilité des coordinations n'a été observé. Qui plus est, aucune influence du niveau de stabilité intrinsèque des patterns de coordination sur l'effet attendu de l'activation n'a été mise en évidence (Beuter & Duda, 1985). Non seulement aucune différence de stabilité entre les deux patterns intrinsèques de la tâche bimanuelle n'a été relevée dans la condition

de repos, mais ce même pattern de résultat a également été observé dans la condition exercice physique.

L'influence de la fréquence d'oscillation suppose une déstabilisation plus importante de la dynamique intrinsèque du système (Haken *et al.*, 1985; Schöner *et al.*, 1986). Pourtant aucune différence de stabilité de la coordination requise n'a été mise en évidence, quelle que soit la condition d'activité. La fréquence d'oscillation imposée n'aurait pas été suffisamment importante pour déstabiliser la dynamique des patterns de coordinations. Il peut ainsi être suggéré que ces derniers seraient d'autant plus perturbés par la contrainte d'activation que la fréquence d'oscillation imposée déstabilise la dynamique du système. Certes ces hypothèses méritent des confirmations expérimentales, ce qui induit la manipulation non seulement de différentes fréquences d'oscillation (de part et d'autre de la fréquence critique du sujet) mais également de l'intensité de l'exercice physique (voir plus haut).

On se retrouve alors face à des patterns de résultats peu interprétables en terme d'effet spécifique de la contrainte d'activation sur la dynamique des coordinations bimanuelles. Puisque le groupe 2 présente une augmentation de la variabilité des deux attracteurs en parallèle de la durée de réalisation, il peut être suggéré que la dynamique résultante ne puisse être *uniquement* comprise par l'influence de la contrainte d'activation sur la dynamique du système.

En premier lieu, il peut être soutenu que le niveau d'activation induit par l'exercice physique se situe dans la zone optimale de performance tel que le prédit le modèle curvilinéaire de Yerkes et Dodson (1908). Or on sait que de part et d'autre de cette zone, de trop bas ou hauts niveaux d'activation sont susceptibles de détériorer la performance. Deuxièmement, le modèle d'Humphreys et Revelle (1984) suggère que le temps passé sur la tâche constitue une contrainte qui, liée à l'ennui, tend à réduire le niveau d'activation. Ceci pourrait expliquer pourquoi les sujets présentent une détérioration progressive du pattern en phase et anti-phase au fil du temps (cf. l'effet du facteur intervalle) principalement localisée sur la 4^{ème} minute de l'essai.

Des différences individuelles peuvent également être envisagées. Plusieurs études suggèrent que les relations entre activation et performance motrice sont extrêmement variables d'un sujet à l'autre. Par exemple, des sujets introvertis

présenteraient de manière générale un niveau d'activation plus élevé que des sujets extravertis (Eysenck & Eysenck, 1968). D'une façon plus spécifique, ces différences seraient liées à l'impulsivité, qui constitue une sous-dimension de l'extraversion (Amelang & Breit, 1983; Humphreys & Revelle, 1984; Revelle, Anderson, Humphreys, 1987). D'autres chercheurs ont insisté sur le rôle que l'anxiété-trait, ou le névrosisme, pouvait jouer dans la régulation du niveau d'activation (Dornic, 1986; Dornic & Birbaumer, 1974; Dornic & Ferneaus, 1981) : les sujets anxieux tendent à répondre aux stressseurs par une élévation plus importante de leur niveau d'activation que les sujets émotionnellement stables. Le non contrôle de ces dimensions différentielles, pouvant annihiler l'effet de l'activation entre les sujets, constitue une des limites interprétatives de l'effet de la contrainte d'activation sur la dynamique des coordinations motrices.

4-5 Conclusion

L'objectif de cette étude était de rendre compte de l'effet de l'état interne du sujet sur la dynamique des coordinations bimanuelles, par l'intermédiaire d'une activation physiologique induite par un exercice physique. Nos résultats suggèrent que cette contrainte d'activation joue un rôle sur la dimension qualitative du système des coordinations bimanuelles lorsque celui-ci évolue dans un environnement instable (dans le cas présent, augmentation en continu de la fréquence). En revanche, en situations stables, l'influence de l'activation n'est pas aussi probante. Plusieurs réserves méthodologiques et théoriques peuvent être avancées afin de faire évoluer la compréhension de la relation activation / performance coordinative dans le cadre des modèles dynamiques (Beuter & Duda, 1985, p. 242).

S'il existe un niveau optimal d'activation synonyme de performance maximale pour chaque individu, une manipulation plus précise et valide de l'exercice physique induit est nécessaire. Ceci consiste tout d'abord en la standardisation des épreuves d'effort physique ainsi que des paramètres physiologiques susceptibles de définir la sollicitation physiologique relative à chacun des participants (Brisswalter, 1992). En effet, la mesure de la fréquence cardiaque ne peut définir à elle seule la différence des niveaux d'activation induit par un exercice physique (Martens, 1976). De la même façon, le contrôle de la dimension émotionnelle intrinsèque à chaque individu serait

plus pertinent, portant ainsi un intérêt certes complexe sur l'ensemble des contraintes liées à l'état " énergétique " du sujet.

Pour finir, il peut être suggéré que les effets différenciés de la contrainte d'activation soient dépendants de l'influence prédominante des propriétés intrinsèques des coordinations motrices. Tout comme pour la contrainte d'effort, l'activation influencerait la dynamique du système principalement dans les situations de compétition, situation où la stabilité du pattern requis est théoriquement *instable*. Dans le cas de situations de convergence, la dynamique intrinsèque jouerait un rôle tellement prédominant dans la dynamique résultante qu'une contrainte d'activation n'aurait que très peu d'incidence sur le niveau de stabilité des coordinations. Ces diverses hypothèses méritent d'être testées, mais la dernière étude que nous allons présenter semble déjà fournir quelques éléments de réponses.

5- Influence d'une situation stressante sur les fonctions de raideur et d'amortissement caractéristiques des coordinations motrices d'une tâche complexe, le simulateur de ski

5-1 Introduction

L'objectif de cette présente étude est d'analyser l'effet d'une contrainte stressante liée à la tâche sur la dimension qualitative de la dynamique des oscillations de la plate-forme d'un simulateur de ski. Les diverses études de cette tâche complexe, s'inscrivant principalement dans le cadre des problématiques d'apprentissage et d'acquisition des habiletés motrices (e.g., Delignières *et al.*, 1999; Durand, Geoffroi, Varray & Préfaut, 1994; Vereijken, 1991; Vereijken, van Emmerik, Whiting & Newell, 1992; Vereijken & Whiting, 1990; Wulf & Weigelt, 1997), ont permis la modélisation des oscillations de la plate-forme sous la forme d'une équation différentielle d'ordre 2, supposée rendre compte de la dynamique d'ensemble des coordinations (Vereijken, Whiting & Beek, 1992) :

$$m\ddot{x} + f(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = 0 \quad (41)$$

où x représente la position de l'oscillateur et les notations dot les dérivées premières (\dot{x} , la vitesse) ou secondes de cette position (\ddot{x} , l'accélération). Le premier terme correspond à l'inertie du système, $g(x)$ exprime la fonction de raideur et $f(x, \dot{x})$ la fonction d'amortissement du système. Comme nous l'avons souligné en introduction (cf. point 4-3-1, p. 38), la fonction d'amortissement peut être composée des termes de type Van der Pol (x^0, x^2, x^4, \dots) et/ou de type Rayleigh ($\dot{x}^0, \dot{x}^2, \dot{x}^4, \dots$).

Dans le cadre de l'approche dynamique, plusieurs études expérimentales (Fontaine *et al.*, 1997; Lee *et al.*, 1995; Zanone et Kelso, 1992, 1994, 1997) ont clairement montré que l'apprentissage pouvait être conçu comme un changement qualitatif non linéaire du comportement (i.e. le passage d'un état stable vers un autre état stable, qualitativement différent) et s'inscrivait sur le long terme dans la dynamique du système. Cette conception de l'apprentissage moteur marque une différence fondamentale avec la définition cognitiviste le décrivant alors comme un processus d'affinement progressif et continu. Or, Newell (1991) a fortement critiqué cette

définition considérant que le caractère progressif et continu de l'apprentissage était le résultat d'artefacts liés entre autres à la simplicité des tâches expérimentales et à la brièveté des études. Ce dernier point constituait d'ailleurs une des interprétations possibles des patterns de résultats de Delignières *et al.* (1999). Tout au long de leur temps de pratique sur simulateur de ski (à savoir 4 sessions successives au cours desquelles 4 essais de 4 minutes étaient réalisées), leurs sujets exploitaient constamment une fonction d'amortissement de type Van der Pol. Aucune modification qualitative n'avait donc été mise en évidence.

Afin de satisfaire les critiques émises par Newell (1991), Delignières, Nourrit et Deschamps (2000) ont donc envisagé une analyse longitudinale de 13 semaines²⁴ des coordinations adoptées lors de la réalisation de tâche d'oscillations sur le simulateur de ski, modifié en monoski. Cette modification avait pour but de garantir du caractère strictement novice des 5 participants au début de l'expérimentation. Dès lors, ils envisageaient qu'après un temps de pratique important, les sujets devaient adopter un comportement expert, se caractérisant par un comportement *qualitativement* différent de celui exploité lors des premiers temps de pratique.

Basés sur une adaptation de la *W-method* de Beek et Beek (1988) destinée à caractériser les différents modèles dynamiques des oscillations de la plate-forme (voir Delignières *et al.*, 1999, p. 771-778), leurs résultats confirmaient cette hypothèse de départ, à savoir l'observation d'une transition de phase entre des comportements qualitativement différents. Après quelques essais chaotiques, les 5 sujets adoptaient dans un premier temps un comportement modélisé par une fonction d'amortissement de type Rayleigh :

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{03}\dot{x}^3 = 0 \quad (42)$$

puis bifurquaient, exploitaient et stabilisaient après un certain temps de pratique un comportement d'amortissement de type Van der Pol :

$$\ddot{x} + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{21}x^2\dot{x} = 0 \quad (43)$$

²⁴ à raison de 3 séances de 10 essais d'1 minute de pratique par semaine, soit 39 séances de travail.

où c_{ij} représente le coefficient de $x_i \dot{x}_j$. Il faut également noter qu'une linéarisation progressive de la raideur a été observée, marquant une perte progressive de l'importance des termes non linéaires (c_{30} et c_{50}) dans la fonction de raideur avec le temps de pratique, ce qu'avait déjà observé Delignières *et al.* (1999).

Ayant l'opportunité de reprendre 4 des 5 sujets impliqués dans l'étude de Delignières *et al.* (2000), nous avons envisagé de placer le simulateur de ski en hauteur afin d'appréhender l'effet de cette contrainte liée à la tâche sur d'éventuelles modifications du comportement exploité par ces sujets, qui ont stabilisé une habileté de haut niveau. L'idée sous-jacente est de générer une situation stressante susceptible de modifier l'état émotionnel des sujets (Mace, 1979), paramètre de contrôle contraignant qualitativement la dynamique du système. Cette hypothèse rejoint la théorie de *progression-régression* de Fuchs (1962).

Dans une tâche de poursuite, l'auteur démontre qu'avec la pratique le système s'appuie davantage sur la complexité du système pour stabiliser sa réponse et minimiser ses erreurs. En d'autres termes, plus le sujet apprend, plus sa réponse motrice est basée sur les dérivées de dimension importante du signal d'entrée (i.e. position, vitesse, accélération, jerk...). Outre cette idée de progression non linéaire de l'apprentissage, Fuchs (1962) suggèrent que des régressions non linéaires puissent survenir en cas de stress : le sujet adopterait et exploiterait de nouveau un comportement déjà fortement appris. Comme le souligne Lee (1998), cette régression représente " une transition de phase à court terme induite par un paramètre de contrôle, traduisant un retour vers un comportement précédemment acquis " (p. 335). On se propose alors de tester cette hypothèse de régression sur la tâche sur simulateur de ski : les 4 sujets, ayant adopté et stabilisé un comportement expert, doivent présenter une transition de phase régressive vers un comportement déjà exploité. En d'autres termes,

- En condition stressante modifiant l'état émotionnel du sujet, ce dernier adopte de nouveau un comportement de type Rayleigh.

5-2 Méthode

5-2-1 Sujets

4 sujets masculins (moy. 29.5 ± 6.45) ont participé à cette expérimentation, réalisée 5 mois après l'étude Delignières *et al.* (2000). Ainsi tous avaient subi une forte pratique (39 séances de travail) et adoptaient à la fin de l'étude un comportement d'amortissement de type Van de Pol.

5-2-2 Appareillage

La tâche était réalisée sur un simulateur Skieur Edge adapté en monoski. En effet, la plate forme sur lesquels reposaient les deux pieds a été modifiée de façon à ce qu'elle soit naturellement en équilibre instable sur son axe central (figure 18). Les données de position de la plate forme étaient enregistrées au moyen d'un potentiomètre, à une fréquence de 100Hz. Dans la condition où le simulateur était placé sur une table haute de 1,85 mètres, la distance entre le sol et les yeux du sujet était d'environ 3.80 mètres. Aucune protection de quelle que nature ce soit n'a été utilisée.

5-2-3 Procédure

Chaque sujet a réalisé 10 essais d'une minute de pratique entrecoupés d'une minute de récupération, et ce pour chaque condition testée, à savoir le simulateur de ski positionné au sol ou en hauteur. Après une séance de reprise de contact avec le dispositif la semaine précédant l'acquisition expérimentale, tous les sujets ont commencé par la condition en hauteur, suivie 4 jours plus tard de la condition au sol. Le temps d'acquisition était de 30 secondes, à savoir de la 15^{ème} à 45^{ème} seconde de l'essai en cours.

Figure 18 : Représentation du dispositif expérimental

5-2-4 Analyses des données et traitements statistiques

Les données de chaque essai se présentant sous forme d'une série temporelle cyclique ont été filtrées par une procédure de transformée de Fourier inverse, avec une fréquence de coupure de 10.00 Hz. La fréquence (Hz) de chaque cycle de mouvement a été déterminée par l'inverse de la période calculée entre deux points successifs et identiques de rebroussement. De la même façon, la moyenne des déviations maximales de la plate forme entre sa position de repos et les points de rebroussement droit et gauche représentait l'amplitude (en centimètres) du mouvement.

Pour chaque échantillon de données, un cycle moyen normalisé a été déterminé (cf. Mottet & Bootsma, 1999). Chaque demi-cycle (i.e. mouvement du point de rebroussement droit au point de rebroussement gauche ou l'inverse) a été normalisé sur 21 points équidistants par une interpolation linéaire. Ensuite ces points ont été ré-

étalonnées dans l'intervalle [-1; 1]. Tous les demi-cycles de même nature ont été moyennés point par point, déterminant ainsi un cycle moyen normalisé de 42 points.

Les dérivées premières et secondes de données de position de cycle moyen ont été calculées et ont été ré-étalonnées dans l'intervalle [-1; 1]. Largement inspirée des diverses méthodes graphiques ou quantitatives proposées par Beek et Beek (1988), la détermination des coefficients (c_{ij}) des termes de l'équation (42) ou (43) représentatifs du type de comportement adopté a été possible par une régression multiple en plaçant \ddot{x} en variable dépendante et les termes supposés rendre compte du comportement en variables indépendantes ($x, x^3, x^5, \dot{x}, \dot{x}^3, x^2 \dot{x}, \dots$). En tenant compte du signe des coefficients des termes (Beek *et al.*, 1996; Delignières *et al.*, 1999; Mottet & Bootsma, 1999), il faut noter que la modification de signe du coefficient d'amortissement linéaire (c_{01}) obtenu lors de l'estimation du modèle Van der Pol²⁵, nécessairement négatif, indique que les données peuvent être ajustées sur le modèle d'amortissement Rayleigh (Beek *et al.*, 1996).

Que ce soit pour l'amplitude, la fréquence ou chaque coefficient déterminé, une ANOVA à mesures répétées 2 (conditions) \times 10 (essais) a été réalisée pour chacune de ces variables dépendantes, avec un seuil de significativité à $p < 0.05$. Des tests post-hoc de type Tukey HSD ont été réalisés le cas échéant.

5-3 Résultats

L'analyse des données d'amplitude a indiqué des effets principaux du facteur condition ($F_{1,3} = 35.473, p < 0.01$) et du facteur essai ($F_{9,27} = 5.369, p < 0.001$). La figure 19 montre que l'amplitude des oscillations observées en condition en hauteur sont significativement inférieures à celles de la condition au sol. L'ANOVA sur la fréquence n'a révélé qu'un effet du facteur essai ($F_{9,27} = 3.856, p < 0.01$).

²⁵ Puisque les 4 sujets avaient adopté et fortement stabilisé ce type de comportement au cours de l'étude longitudinale de Delignières *et al.* (2000), nous avons en priorité testé ce modèle Van der Pol (éq. 43).

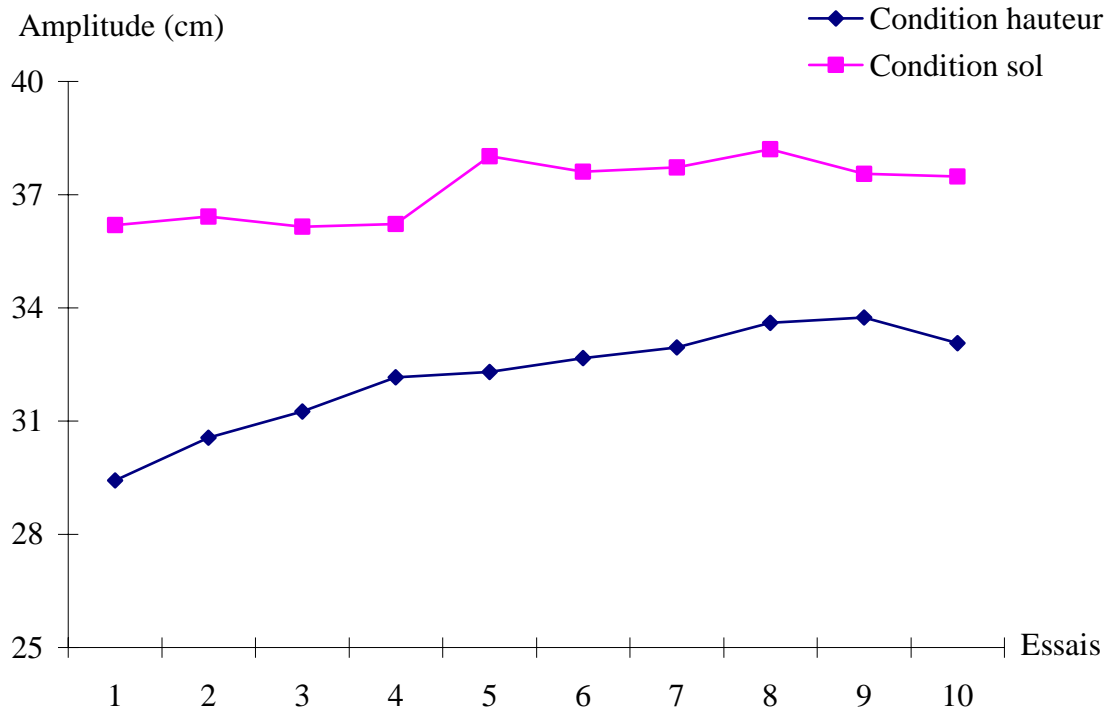


Figure 19 : Evolution moyenne de l'amplitude des oscillations en fonction des conditions testées (au sol ou en hauteur) et du rang de l'essai.

Que ce soit par les procédures graphiques ou statistiques, les estimations du type de comportement adopté ont montré que tous les sujets exploitaient en règle générale un comportement d'amortissement de type Van der Pol dans les deux conditions testées:

$$x + c_{10}x + c_{30}x^3 + c_{50}x^5 + c_{01}\dot{x} + c_{21}x^2\dot{x} = 0 \quad (44)$$

avec $c_{10} < 0$; $c_{30} > 0$, $c_{50} < 0$, $c_{01} < 0$ et $c_{21} > 0$.

Quel que soit le coefficient, aucune ANOVA n'a révélé d'effet significatif, indiquant une contribution de même importance de ces coefficients dans le comportement exploité.

Cependant, la visualisation du coefficient d'amortissement linéaire, c_{01} , du sujet 4 montre une légère influence de la condition en hauteur sur le comportement du système (figure 20). En effet, lors de l'essai 3, 4 et surtout l'essai 5 les valeurs de c_{01} se rapprochent de plus en plus de 0, suggérant que le système ait tendance à se réorganiser autour des deux types d'amortissement possible. Une analyse cycle-à-cycle de l'essai 5 montre que le système s'adapte tout à tour sur un comportement d'amortissement de

type Van der Pol ($c_{01} < 0$) et un amortissement de type Rayleigh ($c_{01} > 0$) (figure 21). Ce même type d'organisation s'est également retrouvé quelque peu lors des essais 3 et 4 réalisés en hauteur.

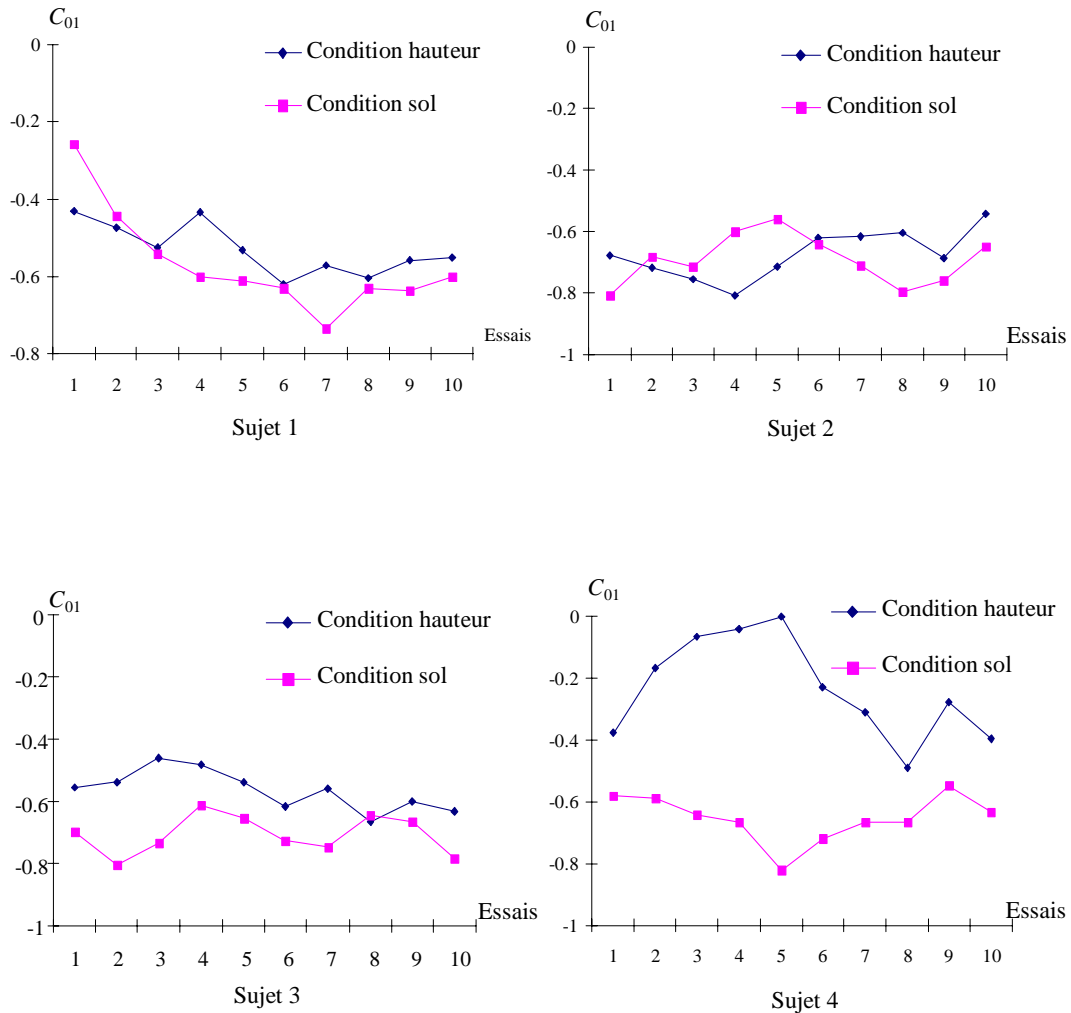


Figure 20 : Evolution du coefficient linéaire d'amortissement c_{01} lors de l'estimation d'un modèle de type Van der Pol pour les 4 sujets.

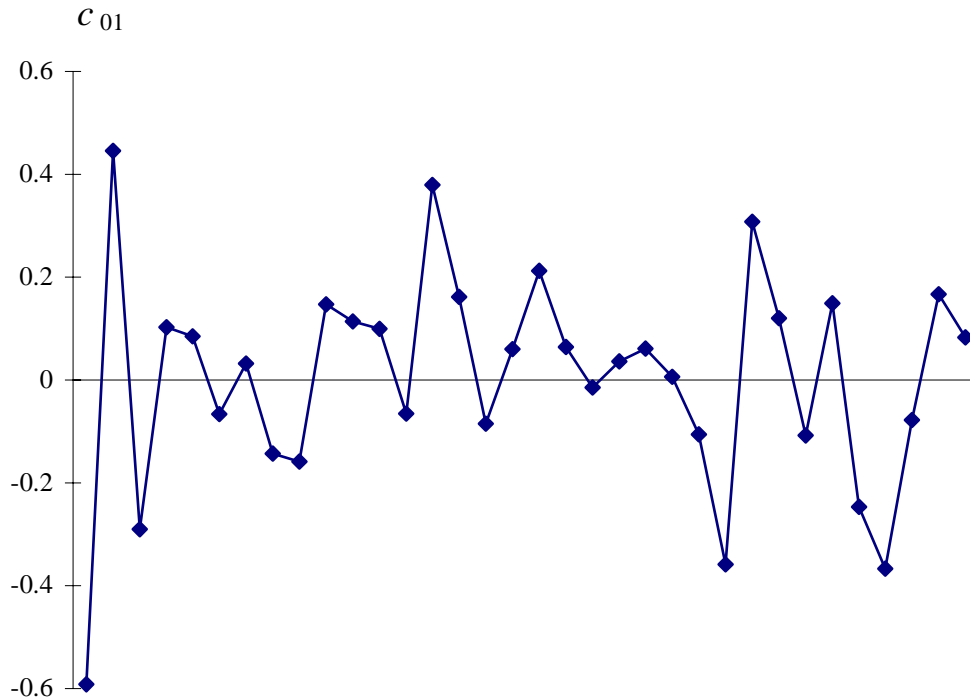


Figure 21 : Evolution des valeurs cycle-à-cycle de c_{01} de l'essai 5 du sujet 4 réalisé en condition en hauteur. Lorsque $c_{01} < 0$, le comportement décrit un modèle de type Van der Pol, alors qu'un $c_{01} > 0$ permet l'ajustement du comportement sur un modèle de type Rayleigh.

5-4 Discussion

Tout comme dans l'expérimentation sur l'effet de la contrainte d'activation induite par un exercice physique, les résultats observés ne confirment pas l'influence attendue d'une contrainte stressante liée à la tâche (i.e. le simulateur de ski posé en hauteur) sur la dynamique du système. L'hypothèse d'une régression du comportement sous l'effet d'un environnement stressant (Fuchs, 1962) n'a pas été validée.

Cette étude faisait suite à une expérimentation où il a été clairement démontré que l'apprentissage moteur était bien rendu compte par un processus de transition de phase entre deux comportements qualitativement différents (Delignières *et al.*, 2000). Après un certain temps de pratique, le passage d'un comportement de type Rayleigh vers un comportement de type Van der Pol décrivait l'exploitation d'un nouvel ensemble d'états possibles par le système dynamique. Qui plus est, cette conceptualisation de l'apprentissage, comme un changement qualitatif s'inscrivant sur

le long terme dans la dynamique du système (Lee & Swinnen, 1993), est confirmée par notre test de rétention (Zanone & Kelso, 1997). En effet, le comportement adopté en situation au sol correspond au même comportement de type Van der Pol réalisé 5 mois auparavant par les mêmes sujets. De ce point de vue, on peut dire que seule l'hypothèse de la progression de Fuchs (1962) ait été démontrée dans cette étude.

En revanche, dans le cadre de la compréhension des réorganisations qualitatives et/ou quantitatives des coordinations motrices sous l'influence des contraintes "émotionnelles", les résultats présentés ne sont pas aussi probants que ceux attendus. Si aucune modification qualitative régressive du comportement n'a été observée, il peut être surprenant qu'aucune perturbation quantitative n'ait été relevée. Les valeurs des coefficients déterminés n'ont pas été quantitativement différentes dans leur contribution à l'estimation du comportement d'amortissement de type Van der Pol, et ce quelle qu'ait été la condition testée. Une fois encore, des explications d'ordre méthodologique et théorique peuvent être avancées.

La première explication possible renvoie au niveau de stress généré par la situation en hauteur. Le stress fait référence à un état de divergences difficilement acceptables par le sujet entre sa perception des exigences de la tâche et ses propres capacités à les satisfaire (Jones & Hardy, 1989, p. 44). Cette évaluation cognitive de la situation proposée fait référence à l'anxiété cognitive décrite dans le modèle de l'anxiété compétitive de Martens *et al.* (1990) ou dans le modèle catastrophe du stress de Hardy et Fazey (1987, cités par Jones et Hardy, 1989). Comme nous l'avons déjà souligné, ces auteurs distinguent du concept d'anxiété deux dimensions, l'une cognitive et l'autre somatique (ou l'activation).

Par exemple, dans leur analyse de l'influence de l'anxiété cognitive sur la relation activation / performance, Hardy et Fazey (1987) indiquent qu'à faible niveau d'anxiété, un modèle en U inversé peut rendre compte des relations entre la performance motrice et le niveau d'activation. En revanche, lorsque le niveau d'anxiété cognitive augmente, une relation de type "catastrophe" s'installe : à un certain niveau d'activation, on observe une chute brutale de performance. En termes dynamiques, cette chute pourrait traduire une transition de phase, à savoir l'adoption d'un comportement qualitativement différent.

On peut alors suggérer que la situation en hauteur n'ait que très peu d'influence "additive" sur le niveau d'activation du sujet et son niveau d'anxiété cognitive. Leur indépendance (Abadie, 1989; Humphreys & Revelle, 1984; Mac Auley, 1985; Morris & Liebert, 1973; Sanders, 1983) laisse penser que leurs niveaux respectifs ne correspondaient pas à la zone "catastrophe" du modèle, même si la contrainte de hauteur a pu modifier une de ces deux dimensions. Il aurait été alors opportun d'en évaluer le niveau, que ce soit par des paramètres physiologiques ou d'inventaires susceptibles de rendre de l'état et du trait d'anxiété du sujet tels que le STAI (*State-Trait Anxiety Inventory*) de Spielberger, Gorsuch et Lushene (1970) ou le CSAI-2 (*Competitive State Anxiety Inventory*) de Martens *et al.* (1990). Ceci permettrait d'appréhender l'influence des différences individuelles sur la dynamique du système, tant au niveau de la perception que le sujet peut avoir des contraintes de la tâche motrice que de sa prédisposition à les exploiter de façon optimale.

L'influence du type de personnalité constitue une contrainte qui ne peut être occultée dans l'analyse et la compréhension du rôle des états motivationnels et émotionnels du sujet sur le processus d'auto-organisation des coordinations motrices. En effet, l'analyse des données du sujet 4 tend à montrer une influence à court terme de la situation en hauteur sur le type de comportement adopté. Durant 3 essais, il semble revenir dans une zone "d'hésitation" comme si le système cherchait le comportement le plus optimal entre l'amortissement Van der Pol et l'amortissement Rayleigh. Le système s'est retrouvé dans la même situation (cf. figure 21) que celle décrite par Delignières *et al.* (2000) lors des essais enregistrés au moment de la bifurcation Rayleigh - Van der Pol.

Cette bifurcation s'accompagnait d'un accroissement brusque de la fréquence d'oscillation, passant d'une valeur de 1Hz lors des essais la précédant à une valeur moyenne de 1.4Hz. Or aucune diminution de la fréquence n'a été observée dans la condition en hauteur, ne pouvant expliquer ce retour vers un comportement de type Rayleigh. Qui plus est, tous les essais suivant cette bifurcation, ainsi que ceux de notre test de rétention, ont bien confirmé l'optimisation et la stabilisation du comportement de type Van der Pol. Cette période "d'hésitation" ou de "régression" du sujet 4 peut alors être interprétée comme l'influence de la contrainte de hauteur (i.e. modifiant le niveau d'anxiété du sujet) sur la dynamique du système.

5-5 Conclusion

L'objectif de cette étude était d'analyser les effets d'une contrainte stressante sur la dynamique du comportement exploité lors de la réalisation d'une tâche d'oscillations sur simulateur de ski. L'idée sous-jacente était de dépasser l'effet spécifique de la composante intensive de l'état émotionnel du sujet, à savoir l'activation, en envisageant également le rôle des attentes cognitives sur la dynamique résultante.

Certes nos résultats n'ont pas confirmé notre hypothèse de base qui envisageait le retour vers un attracteur déjà adopté par le système lors du processus d'apprentissage. Il est également important de relever qu'en règle générale aucune modification quantitative du comportement n'a été observée. Pourtant quelques indices (cf. résultats du sujet 4) suggèrent que les interactions complexes entre les contraintes anxiogènes et motivationnelles, intrinsèques à chaque sujet, (Atkinson, 1957; Martens *et al.*, 1990, Roberts, 1991), jouent un rôle dans la dynamique qualitative et quantitative résultante du processus d'auto-organisation. Bien entendu, ceci nécessite des preuves expérimentales supplémentaires, mais l'analyse macroscopique des coordinations motrices dans le cadre de l'approche dynamique semble offrir de nouvelles perspectives dans la compréhension de l'influence de ces dimensions émotionnelles et motivationnelles sur le contrôle du comportement moteur.

Conclusion générale

Au travers de l'analyse de la dynamique non linéaire des systèmes complexes (Haken, 1983), l'étude du comportement moteur, conçu comme des structures coordinatives (Kugler *et al.*, 1980) émergeant des interactions du système de contraintes (Newell, 1986), a permis de caractériser à un niveau macroscopique des comportements *collectivement* stables, d'observer des phénomènes de transition de phase résultant de modifications de paramètres de contrôle ou encore d'hystérésis. Le premier lien pertinent entre les données expérimentales et les modèles formels dérivés de la synergétique a été établi par les études de Kelso (1981a, 1981b, 1984) sur la dynamique d'une tâche rythmique de coordinations des index. L'apparition spontanée d'une transition de phase du mode de coordination en anti-phase vers le pattern en phase sous une augmentation progressive de la fréquence d'oscillation a constitué le premier exemple démontrant que le mouvement pouvait être modélisé en tant qu'oscillateurs non linéaires couplés (Haken *et al.*, 1985; Kay *et al.*, 1987).

Dès lors, les développements des modèles mathématiques déterministes sous la forme d'équations de potentiel, agrémentées des propriétés stochastiques inhérentes aux systèmes non linéaires et fondamentales dans la compréhension des systèmes de coordination (Schöner *et al.*, 1986), ont permis de tester un large panel de prédictions (i.e. ralentissement critique, fluctuations critiques, transitions de phase...). Ces diverses recherches expérimentales se sont par exemple intéressées à la dynamique de phénomènes comportementaux tels que (1) l'influence du flux optique sur l'équilibre postural (Schöner, 1994), (2) la transition marche-course (Turvey, Holt, Obusek, Salo & Kugler, 1996), (3) les coordinations bimanuelles réalisées selon différents rapports de fréquences (Peper *et al.*, 1995; Sternad, Saltzman & Turvey, 1998), (4) la dynamique de mouvements rythmiques continus et discrets (Saltzman & Kelso, 1987; Sternad *et al.*, 1999a), (5) celle de mouvements à multiples degrés de liberté tels que le jonglage (Beek, 1989), (6) les relations entre le comportement et les patterns d'activité cérébrale (Fuchs, Kelso & Haken, 1992), ou bien (7) l'influence de contraintes spécifiques telles l'apprentissage (Zanone & Kelso, 1994), la perception (Tuller & Kelso, 1989), la mémorisation (Yamanishi *et al.*, 1980), ou les intentions (Schöner & Kelso, 1988a, 1988c).

Bien que cette liste ne soit pas exhaustive, force est de constater le peu d'études traitant de l'influence des contraintes cognitives sur la dynamique des coordinations motrices. En effet, comme le souligne Walter (1998, p. 327), " la branche " dure " des dynamiciens a longtemps minimisé ou exclu le rôle de la cognition dans la dynamique des patterns de coordinations ". Or, " la façon dont le sujet peut [percevoir], concevoir la tâche, peut influencer la qualité de la performance motrice ". Cette dernière serait également " dépendante de la stratégie cognitive " adoptée ou subie (par exemple, par l'intermédiaire d'instructions précises, cf. Lee *et al.*, 1996) par le sujet. Dans cette perspective, notre travail a tenté d'incorporer le rôle des contraintes liées à la motivation (i.e. les intentions, l'effort) ou liées aux émotions du sujet (i.e. l'activation, le stress, l'anxiété...) dans les théories dynamiques du contrôle moteur et de contribuer quelque peu à la compréhension de la complexité des systèmes de coordinations.

La première expérience a montré que la dynamique intrinsèque des coordinations motrices bimanuelles pouvait *positivement* s'accommoder des intentions du sujet. Conceptualisées et modélisées en tant " qu'information comportementale " (Schöner & Kelso, 1988a, cf. équation 24), ces contraintes intentionnelles permettent de retarder le phénomène de transition de phase : dans un protocole d'incrémentations continue de la fréquence d'oscillation, le temps de maintien du pattern en anti-phase est significativement plus long dès lors qu'il est clairement demandé au sujet de résister intentionnellement à la transition de phase. De ce fait, ce type d'information comportementale ne constitue plus " une concession implicite de l'importance des processus cognitifs dans les systèmes dynamiques " (Walter, 1998, p. 330), mais une preuve expérimentale réellement explicite du rôle des intentions dans le contrôle des coordinations motrices.

Dépassant les réserves méthodologiques et théoriques rencontrées dans les travaux de Scholz et Kelso (1990) ou de Lee *et al.* (1996) traitant également de l'influence des intentions sur la dynamique du système de la tâche bimanuelle, cette première étude a clairement indiqué que la manipulation de la composante directionnelle des intentions (i.e. le but à atteindre, le ψ de l'équation 24) renforçait le potentiel d'attraction du pattern de coordination visé. En effet, pour une même fréquence, l'analyse du niveau de stabilité pré-transition du pattern en anti-phase montrait une différence significative de la variabilité de la phase relative entre les deux

conditions testées, différentes en termes d'instructions intentionnelles. Ce résultat, ne pouvant être imputé à l'effet de la fréquence d'oscillation, suggérait une forte influence de la dimension intensive des intentions dans la dynamique résultante observée. La dimension directionnelle des intentions *positionne* le système sur le pattern visé, mais son maintien serait fortement dépendant du niveau d'investissement intentionnel du sujet (i.e. le c_{int} de l'équation 24). Ce niveau d'effort aurait pour vertu de contrôler le niveau d'instabilité inhérent au système.

Ces prédictions théoriques ont été confirmées par l'étude spécifique de la contrainte d'effort, c'est-à-dire le niveau d'allocation des ressources investies par le sujet pour satisfaire les exigences de la tâche (Humphreys & Revelle, 1984). Ces résultats ont nettement montré l'influence prédominante du niveau d'investissement cognitif du sujet sur la qualité du comportement moteur. Soumis à deux types de consignes intentionnelles différant uniquement en termes d'intensité, les sujets étaient non seulement capables de maintenir le pattern attendu, mais également d'en réduire le niveau d'instabilité. Cette réduction était significativement différente selon la nature des consignes reçues : lorsqu'il était demandé aux sujets de se concentrer et d'investir des ressources intentionnelles, les patterns de résultat montraient de faibles niveaux de fluctuations du pattern visé (Deschamps, Lauriot, Caillou, Nourrit & Delignières, 1999).

Il est important de relever que l'influence de la contrainte d'effort est uniquement prédominante dans les tâches de compétition, c'est-à-dire lorsque le pattern à atteindre ne correspond pas à une des solutions intrinsèquement stables du système. L'effort contraint la dynamique du contrôle des coordinations motrices sur la base du niveau de fluctuations inhérentes aux conditions de réalisation du pattern visé (Walter, 1998, p. 330). Non seulement ce résultat rend compte de la pertinence du rôle dynamique de la stabilité et de l'instabilité du mouvement remarquablement défendu par Lyapunov (1992), mais soulève de nouveaux axes de recherche, que ce soit au niveau de la mobilisation individuelle d'effort, de la dynamique de cette mobilisation, de son influence dans le processus d'apprentissage ou bien encore dans le processus d'optimisation des habiletés motrices.

En effet, la réduction de l'instabilité des coordinations théoriquement en compétition avec la dynamique intrinsèque du système a été confirmée

mathématiquement par la détermination quantitative de niveaux d'effort significativement plus importants (Deschamps, Nourrit, Lauriot & Delignières, soumis). Basée sur l'évolution des lois probabilistes des systèmes déterministes stochastiques (Collins et Turvey, 1997; Parisi, 1999; Schöner *et al.*, 1986), cette procédure semble pouvoir appréhender l'influence des caractéristiques individuelles sur la stabilité des coordinations. L'optimisation de la stabilité du mouvement est-elle limitée par la capacité individuelle d'investissement intentionnelle du sujet? La question n'est pas tant de savoir si le niveau de fluctuations des patterns de coordination peut tendre vers un équilibre absolu²⁶, mais si l'influence de la contrainte de l'effort est limitée individuellement dans la durée. Une étude de la dynamique de l'investissement intentionnel en parallèle de la dynamique du niveau de fluctuations de la coordination visée pourrait définir le niveau de contrôle des contraintes du système.

Dans cette même logique, le processus d'apprentissage des coordinations motrices serait influencé par les traits et les états de personnalité implicitement évoqués précédemment, dont dépend le niveau d'effort investi par le sujet (Humphreys & Revelle, 1984, p. 155). Une forte contrainte d'effort accélérerait l'acquisition d'une nouvelle coordination d'une part en créant et contrôlant un potentiel d'attraction au niveau du pattern visé et d'autre part en réduisant momentanément la force attractive des tendances intrinsèques du système. Comme nous l'avons déjà suggéré, l'effort serait une contrainte facilitant les modifications qualitatives du comportement moteur et sa valeur quantitative une preuve cohérente des problèmes et des enjeux inhérents au niveau d'expertise du sujet. L'utilisation de la contrainte d'effort servirait tant aussi bien l'acquisition des habiletés motrices que leur contrôle et optimisation. Dans le premier cas, sa diminution marquerait la fin de l'apprentissage. En revanche, ce ne serait pas tant le niveau d'effort en lui-même qui serait prédominant dans le second cas, mais davantage sa dynamique, à savoir la durée de mobilisation ou bien encore la stratégie individuelle qui accompagne cette mobilisation (cf. 4^{ème} proposition de Locke et Latham, 1985, p. 57 de ce document).

²⁶ Cette hypothèse semble très improbable pour au moins deux raisons : (1) Nous n'avons pas observé d'effet de la contrainte d'effort dans les situations de convergence contrairement aux prédictions et simulations théoriques du modèle de Schöner et Kelso (1988c). (2) Le caractère bruité d'un système vivant, inhérent aux contraintes qu'il subit, est fondamental dans la compréhension des modifications qualitatives et quantitatives de son comportement.

Comme le soulignent les divers modèles cognitivo-énergétiques (Gaillard, 1993; Sanders, 1983) et tout particulièrement le modèle d'Humphreys et Revelle (1984), lorsqu'on s'intéresse aux effets de contraintes cognitives susceptibles de moduler la dynamique des coordinations motrices, telles que les contraintes motivationnelles, on ne peut ignorer l'influence des contraintes émotionnelles subies ou adoptées par le sujet. Ainsi la manipulation du concept d'anxiété semble aujourd'hui répondre à ces attentes. En distinguant sa dimension directionnelle, l'anxiété cognitive (les attentes et auto-évaluations négatives) de sa dimension intensive (l'activation) (Martens *et al.*, 1990), nous avons tenté de démontrer l'influence d'une contrainte liée à une situation stressante et d'une contrainte d'activation physiologique sur les dimensions qualitatives et quantitatives du comportement moteur.

Dans une condition post-exercice physique, des transitions plus précoces du pattern en anti-phase vers le pattern en phase ont été observées lors d'un protocole d'incrémentations continues de la fréquence d'oscillation. Ce résultat démontre que la modification du degré d'activité énergétique de l'organisme du sujet joue un rôle *négatif* sur la dynamique du système de coordinations bimanuelles. Sous la contrainte d'activation, les sujets s'accommodent plus difficilement de l'augmentation progressive de l'instabilité du pattern en anti-phase liée à l'effet de la fréquence. L'influence des fluctuations stochastiques interviendrait alors plus précocement dans le système, laissant sous-entendre que les paramètres a et b (plus particulièrement le rapport b/a) de l'équation de potentiel du modèle de Schöner *et al.* (1986) aient été plus rapidement modifiés dans la condition exercice physique.

Pourtant, les analyses de l'effet de l'activation sur les coordinations intrinsèques de la tâche bimanuelle réalisée à fréquences sous-critiques, constantes au cours de l'essai ($F_c - 0.5\text{Hz}$), n'ont pas confirmé cette hypothèse. Si l'activation avait pour effet de réduire le potentiel d'attraction des patterns de coordination, en plaçant les sujets sous des conditions de fréquence proche de leur fréquence critique, des modifications qualitatives et quantitatives du comportement étaient attendues (surtout pour le pattern en anti-phase). Non seulement aucune transition de phase n'a été observée, mais aucune différence d'instabilité des deux attracteurs entre les deux conditions d'activité testées (repos versus exercice physique) n'a été mise en évidence.

A l'heure actuelle, au vu de ces résultats “ paradoxaux ”, comprendre l'influence de l'activation sur la dynamique des coordinations bimanuelles semble difficile au regard du modèle macroscopique de Schönér *et al.* (1986). Certes des réserves méthodologiques et théoriques méritent des investigations supplémentaires. Un contrôle plus rigoureux du niveau d'activation induit par l'exercice physique est nécessaire, tant dans la définition de la réelle sollicitation physiologique relative à chacun des participants (Brisswalter, 1992), que dans l'évaluation des différences individuelles liées à l'impulsivité ou l'anxiété-trait (Humphreys & Revelle, 1984). Dans cette perspective, des effets différenciés de l'activation fonction de son niveau (par exemple en testant différentes intensités d'exercice) et du niveau d'instabilité intrinsèque des coordinations bimanuelles peuvent être attendus.

Puisque le niveau macroscopique d'analyse n'indique pas clairement d'influence de l'activation sur la dynamique de la tâche bimanuelle, des hypothèses liées à la dynamique du couplage entre les oscillateurs (cf. Haken *et al.*, 1985; Kay *et al.*, 1987) sont possibles. En effet, Peper et Beek (1998a, 1998b) suggèrent que la transition de phase apparaît lorsque la stabilité du pattern en anti-phase devient trop faible pour résister aux fluctuations stochastiques. La dynamique des coordinations ne serait pas la résultante de la relation inverse entre la fréquence d'oscillation et l'amplitude mais davantage liée à des effets de filtrage des propriétés bio-mécaniques et neuromusculaires des oscillateurs impliquées dans la réalisation de la tâche (Peper et Beek, 1999, p. 277-278).

Selon cette logique, quelle que soit la nature de la sollicitation physiologique, soit au niveau central soit au niveau périphérique, certaines hypothèses peuvent alors être proposées. Si l'on considère que la raideur linéaire des oscillateurs impliqués est le seul paramètre contrôlé par le système nerveux central (Haken *et al.*, 1985; Kay *et al.*, 1987), on peut faire l'hypothèse qu'un niveau d'activation, induit par un exercice physique, perturbe la dynamique du couplage entre les oscillateurs. En effet, Melo et Laurent (1994) ont démontré que le niveau d'activation entraînait une modification de la raideur du système musculaire. Dans cette perspective, il peut être attendu que cette perturbation ait d'autant plus d'influence sur la dynamique du système que les membres impliqués dans la tâche de coordination auront été spécifiquement et fortement sollicités par un exercice physique.

Pour finir, l'étude de l'influence d'une situation anxiogène générant un stress chez le sujet n'a pas confirmé l'hypothèse d'une régression de la coordination observée vers des comportements précédemment exploités par le sujet lors de la phase initiale d'acquisition d'une habileté motrice (Fuchs, 1962). Encore une fois, l'hypothèse que l'influence des contraintes motivationnelles et émotionnelles sur le contrôle moteur s'accommoderait *positivement* ou *négalement* du niveau de stabilité du comportement du système peut être émise (Walter *et al.*, 1998).

Dans la situation où les coordinations auraient été fortement optimisées en termes de stabilité²⁷, l'influence de cette dynamique intrinsèque serait tellement prédominante sur le comportement résultant que les contraintes motivationnelles et émotionnelles pèseraient que très peu sur le processus d'auto-organisation du système²⁸.

Si aucune modification qualitative et quantitative du type de comportement adopté sur le simulateur de ski (amortissement de type Rayleigh ou Van der Pol) n'a été observée dans la condition en hauteur, l'effet du stress pourrait se refléter d'une part sur la dynamique du décalage de phase entre les oscillations transversales de la plate-forme et les oscillations verticales du centre de gravité du sujet (Nourrit, Delignières, Deschamps & Lauriot, 2000), et d'autre part sur l'évolution des couplages inter-articulaires (Vereijken, 1991). Dans le premier cas, on s'attend à ce que les stratégies de forçage du sujet sur le simulateur du ski, différentes selon le type de comportement adopté (Nourrit *et al.*, 2000), soient spécifiques au niveau de stress induit par la situation. Par contre, si l'apprentissage se traduit par une libération progressive des degrés de liberté (i.e. diminution des corrélations inter-articulaires) (Bernstein, 1967), le contrôle de la contrainte de stress induite par la condition en hauteur doit s'accompagner du "regel" d'un certain nombre des degrés de liberté précédemment

²⁷ A ce niveau, on peut également faire l'hypothèse que cette optimisation de la stabilité du comportement adopté s'accompagne d'une efficacité énergétique maximale. Ceci est fortement suggéré par les résultats de Nourrit, Deschamps, Lauriot, Caillou et Delignières (2000) qui ont montré que le coût du mouvement ($\dot{V}O_2$ / amplitude * fréquence) diminue significativement avec la pratique.

²⁸ On peut rappeler qu'aucun effet de l'effort, de l'activation ou du stress n'a été observé lors de la réalisation de la tâche bimanuelle en situations de convergence ou de la tâche sur simulateur de ski dont le comportement a été fortement optimisé par le temps de pratique (Delignières *et al.*, 2000).

autonomes. D'importantes corrélations inter-articulaires réapparaîtraient. Des analyses en cours tentent de valider ces hypothèses.

Bien que le rôle d'une contrainte stressante dans la dynamique des coordinations motrices n'ait pas été clairement cerné lors de cette première tentative, l'analyse individuelle des patterns de résultats incite à poursuivre nos travaux. Une manipulation rigoureuse des traits de personnalité, des niveaux d'anxiété cognitive, d'anxiété somatique et d'allocation des ressources rendrait compte de l'influence d'une situation anxiogène sur le comportement moteur. Nous sommes convaincus que l'analyse dynamique du comportement permet de dépasser les difficultés rencontrées par l'approche cognitiviste pour intégrer ces dimensions motivationnelles et émotionnelles dans les problématiques d'apprentissage et du contrôle de la performance motrice. En effet, la capture du comportement au niveau collectif et macroscopique permet *réellement* d'appréhender les effets des contraintes sur les coordinations motrices, que ce soit au travers de leur stabilité, et/ou de la perte de cette stabilité conduisant à un changement qualitatif du comportement moteur.

Dans ce cadre, nous croyons que les quelques brèches que nous avons ouvertes apportent de nouveaux éclairages sur l'influence des intentions, de l'effort, de l'activation ou du stress. Certes ces investigations expérimentales doivent encore être poursuivies, mais l'intégration dynamique et mathématique du rôle des *motivations* et des *émotions* dans la réalisation d'une performance motrice offrirait une nouvelle pertinence aux enjeux majeurs de la motricité humaine : l'optimalisation des pratiques sportives et des procédures d'apprentissage moteur.

Bibliographie

- Abadie, B. (1989). Effects of competitive outcome on state anxiety. *Perceptual and Motor Skills*, 69, 1057-1058.
- Adams, J. A. (1975). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.
- Amazeen, E. L., Amazeen, P. G., Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1997). Attention and handedness in bimanual coordination dynamics. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23, 1552-1560.
- Amazeen, E. L., Sternad, D., & Turvey, M. T. (1996). Predicting the nonlinear shift of stable equilibria in interlimb rhythmic coordination. *Human Movement Science*, 15, 521-542.
- Amelang, M. & Breit, C. (1983). Extraversion and rapid tapping: reactive inhibition or general cortical activation as determinants of performance differences. *Personality and individual differences*, 4, 103-105.
- Arcelin, R., & Brisswalter, J. (2000). *Fonctionnement cognitif et sollicitation des processus physiologiques : une méta-analyse*. Papier présenté au Congrès de la Société Française de la Psychologie du Sport. Paris, 7-10 Juillet.
- Arcelin, R., Delignières, D., & Brisswalter, J. (1998). Selective effects of physical exercise on choice reaction processes. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 175-185.
- Ash, R. B., & Gardner, M. F. (1975). *Topics in stochastic processes*. New-York : Academic Press.
- Atkinson, J. W. (1957). Motivational determinants of risk-taking behavior. *Psychological Review*, 64, 359-372.
- Baldissera, F., Cavallari, P., & Civaschi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neurosciences Letters*, 34, 95-100.

- Baldissera, F., Cavallari, P., Marini, G., & Tassone, G. (1991). Differential control of in-phase and anti-phase coupling of rhythmic movements of ipsilateral hand and foot. *Experimental Brain Research*, 83, 375-380.
- Beek, P. J. (1989). Timing and phase locking in cascade juggling. *Ecological Psychology*, 1, 55-96.
- 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., 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.
- Belorizky, E. (1998). *Probabilités et Statistiques dans les sciences expérimentales*. Paris : Nathan.
- Bergé, P., Pomeau, Y., & Dubois-Gange, M. (1997). *Des rythmes au chaos*. Paris : Opus.
- Bergé, P., Pomeau, Y., & Vidal, C. (1984). *L'ordre dans le chaos*. Paris : Hermann.
- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford : Pergamon Press.
- Beuter, A., & Duda, J. L. (1985). Analysis of the arousal/motor performance relationship in children using movement kinematics. *Journal of Sport Psychology*, 7, 229-243.
- Beuter, A., & Lefebvre, R. (1988). Un modèle théorique de transition de phase dans la locomotion humaine. *Canadian Journal of Sport Science*, 13, 247-253
- Bingham, G. P. (1988). Task-specific devices and the perceptual bottleneck. *Human Movement Science*, 7, 301-342.

- Bingham, G. P., Schmidt, R. C., Turvey, M. T., & Rosenblum, L. D. (1991). Task dynamics and resource dynamics in the assembly of a coordinated rhythmic activity. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *17*, 359-381.
- Bingham, G. P., Schmidt, R. C., & Zaal, F. T. J. M. (1999). Visual perception of relative phasing of human limb movements. *Perception & Psychophysics*, *61*, 246-258.
- Blanc-Lapierre, A., & Fortet, R. (1953). *Théorie des fonctions aléatoires : Applications à divers phénomènes de fluctuation*. Paris : Masson.
- Bonnet, M., Guiard, Y., Requin, J., & Semjen, A. (1994). Mécanismes généraux de la motricité. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 587-656). Paris : PUF.
- Bootsma, R. J., Fayt, V., Zaal, F. T. J., & Laurent, M. (1997). On the information-based regulation of movement : Things Wann (1996) may want to consider. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *23*, 1282-1289.
- Boutcher, S. H., & Zinsser, N. W. (1990). Cardiac deceleration of elite and beginning golfers during putting. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *12*, 37-47.
- Boyce, B. A. (1994). The effects of goal setting on performance and spontaneous goal-setting behavior of experienced pistol shooters. *The Sport Psychologist*, *8*, 87-93.
- Brisswalter, J. (1992). *Interférences entre les processus physiologiques et cognitifs : Effet des facteurs d'expertise dans la tâche cognitive et de la condition physique*. Mémoire pour le diplôme de l'INSEP.
- Brisswalter, J., & Legros, P. (1996). Interactions entre les processus physiologiques et cognitifs : modèles théoriques et approche méthodologique. *Sciences et Sports*, *11*, 71-80.

- Brisswalter, J., Legros, P., & Delignières, D. (1994). Interactions entre processus cognitifs et physiologiques : effet du niveau d'effort et du niveau de condition physique des sujets. *Sciences et Motricité*, 23, 25-31.
- Brisswalter, J., & Mottet, D. (1996). Energy cost and stride duration variability at preferred transition gait speed between walking and running. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 21, 471-480.
- Broadbent, D. E. (1957). Effects of noises of high and low frequency on behavior. *Ergonomics*, 1, 21-29.
- Buchanan, J. J., & Kelso, J. A. S. (1993). Posturally induced transitions in rhythmic multijoint movements. *Experimental Brain Research*, 94, 131-142.
- Byblow, W. D., Carson, R. G., & Goodman, D. (1994). Expressions of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, 13, 3-28.
- Byblow, W. D., Chua, R., & Goodman, D. (1995). Asymmetries in coupling dynamics of perception and action. *Journal of Motor Behavior*, 27, 123-137.
- Carson, R. G., Byblow, W. D., Abernethy, B., & Summers, J. J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 15, 565-589.
- Carson, R. G., Goodman, D., Kelso, J. A. S., & Elliott, D. (1994). Intentional switching between patterns of interlimb coordination. *Journal of Human Movement Studies*, 27, 201-218.
- Chabert J-L., & Dahan Dalmedico, A. (1991). Henri Poincaré, le précurseur. *La recherche*, 232, 566-570.
- Collins, D. R., & Turvey, M. T. (1997). A Stochastic analysis of superposed rhythmic synergies. *Human Movement Science*, 16, 33-80.
- Collins, J. J., & Stewart, I. N. (1993). Coupled nonlinear oscillators and the symmetries of animal gaits. *Journal of Nonlinear Science*, 3, 349-392.

- Colvin, C. & Jacobs, R. (1993). Behavioral and physiological correlates of goal-directed behaviour. *Human Performance*, 6, 115-134.
- Court, M. L. J., Bennett, S. J., Davids, K., & Williams, A. M. (1998). Effects of anxiety on bimanual coordination. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 20, S103.
- Davey, C. P. (1973). Physical exertion and mental performance. *Ergonomics*, 16, 595-599.
- Davids, K., Bennett, S., Court, M., Tayler, M., & Button, C. (1997). The cognition-dynamics interface. In R. Lidor & M. Bar-Eli (Eds.), *Innovations in Sport Psychology : Linking Theory and Practice. Proceedings of the IX Congress of Sport Psychology* (pp. 224-226). Paris : INSEP Publications.
- Davids, K., Handford, C., & Williams, M. (1994). The natural physical alternative to cognitive theories of motor behaviour : An invitation for interdisciplinary research in sports sciences. *Journal of Sports Sciences*, 12, 495-528.
- De Gennes, P-G. (1987). L'ordre dans le chaos. *Bibliothèque pour la science*, 6-7.
- Delignières, D. (1993a). *Approche psychophysique de la perception de la difficulté dans les tâches perceptivo-motrices*. Thèse non publié, Université Paris V.
- Delignières, D. (1993b). La perception de l'effort et de la difficulté. In J. P. Famose (Eds.). *Cognition et performance* (pp. 183-218). Paris : INSEP Publications.
- Delignières, D. (1995). Effects of heat stress and time on task on reaction time. In R. Vanfraechem-Raway & Y. Vanden Auweele (Eds.), *Integrating laboratory and fields studies : Proceedings of the IXth European Congress on Sport Psychology* (pp. 156-159). Bruxelles : FEPSAC.
- Delignières, D., Brisswalter, J., & Legros, P. (1994). Influence of physical exercise on choice reaction time in sport experts : the mediating role of resource allocation. *Journal of Human Movement Studies*, 27, 173-188.
- Delignières, D., Famose, J. P., & Genty, J. (1994). Validation d'une échelle de catégories pour la perception de la difficulté. *Revue S.T.A.P.S.*, 34, 77-88.

- Delignières, D., Nourrit, D., & Deschamps, T. (2000). *L'évolution des coordinations motrices au cours de l'apprentissage : continuités et ruptures*. Papier présenté au Congrès de la Société Française de la Psychologie du Sport. Paris, 7-10 Juillet.
- Delignières, D., Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B. & Caillou, N. (1999). Effects of practice and task constraints on stiffness and friction functions in biological movements. *Human Movement Science*, 18, 769-793.
- Delignières, D., Nourrit, D., Sioud, R., Leroyer, P., Zattara, M. & Micallef, J.P. (1998). Preferred coordination modes in the first steps of the learning of a complex gymnastics skill. *Human Movement Science*, 17, 221-241.
- Deschamps, T., Lauriot, B., Caillou, N., Nourrit, D., & Delignières, D. (1999). *Effet de la force de l'intention sur la variabilité des patterns intrinsèques d'une tâche bimanuelle*. Papier présenté au VIII^e Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives. Macolin, 31 Octobre – 3 Novembre 1999.
- Deschamps, T., Lauriot, B., Nourrit, D., Caillou, N., & Delignières, D. (sous presse). Effets de la force de l'intention sur la variabilité des patterns spontanés d'une tâche de coordination bimanuelle de coordination. *Science & Motricité*.
- Deschamps, T., Legros, A., Lauriot, B., & Delignières, D. (2000). *Evaluation de l'effort requis pour la réalisation de différentes coordinations de la tâche bimanuelle*. Papier présenté au Congrès de la Société Française de la Psychologie du Sport. Paris, 7-10 Juillet.
- Deschamps, T., Nourrit, D., Lauriot, B., & Delignières, D. (soumis). Determination of the intentional investment level while performing a bimanual coordination task. *Human Movement Science*.
- Diner, S. (1992). Les voies du chaos déterministe dans l'école russe. In A. Dahan Dalmedico, J-L. Chabert, & K. Chemla (Eds.), *Chaos et déterministe* (pp. 331-370). Paris : Seuil, "Points-Sciences".
- Ditto, W., & Pecora, L. (1995). La maîtrise du chaos. In *Le chaos* (pp. 68-77), Paris : Bibliothèque pour la Science.

- Dornic, S. M. (1986). Traitement de l'information, stress et différences interindividuelles. *Travail Humain*, 49, 61-73.
- Dornic, S. M., & Anderson, O. (1980). Difficulty and effort : a perceptual approach. *Report from the Department of Psychology*, University of Stockholm, n°556.
- Dornic, S., & Birbaumer, N. (1974). Information overload and perceived difficulty in "neurotics". *Reports from the institut of Applied Psychology*, University of Stockholm, n°49.
- Dornic, S., & Ferneaus, S. E. (1981). Individual differences in high-load tasks: The effect of verbal distraction. *Report of the Department of Psychology*, University of Stockholm, n°569.
- Dornic, S. M., Sarnecki, M., Larsson, T., & Svensson, J. (1974). Performance and perceived difficulty : the effects of noise and distraction. *Reports from the institut of Applied Psychology*, University of Stockholm, n°51.
- Duffy, E. (1957). The psychological significance of the concept of "arousal" or "activation". *Psychological Review*, 64, 265-275.
- 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.
- Durand, M., Goudal, D., Mercier, J., Le Gallais, D., & Micallef, J-P. (1994). Energy correlate of gait change according to locomotion speed. *Journal of Human Movement Studies*, 26, 187-203.
- Ekeland, I. (1995). *Le chaos*. Evreux : Flammarion, Dominos.
- Eysenck, H. J., & Eysenck, S. B. G. (1968). *Personality structure and measurement*. San Diego : Knapp.
- Flesselles, J-M., Croquette, V., & Janiaud, B. (1995). La ronde des oscillateurs. In *Le chaos* (pp. 78-81), Paris : Bibliothèque pour la Science.

- Fleury, M., Bard, C., Jobin, J., & Carrière, L. (1981). Influence of different types of physical fatigue on a visual detection task. *Perceptual and motor skills*, 53, 723-730.
- Fontaine, R. J., Lee, T., & Swinnen, S. P. (1997). Learning a new bimanual coordination pattern : reciprocal influences of intrinsic and to-be-learned patterns. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 51, 1-9.
- Frowein, H. W. (1981). Selective effects of barbiturate and amphetamines on information processing and response execution. *Acta Psychologica*, 47, 105-115.
- Fuchs, A. H. (1962). The progression-regression hypotheses in perceptual-motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 177-182.
- Fuchs, A., & Kelso, J. A. S. (1994). A theoretical note on models of interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20, 1088-1097.
- Fuchs, A., Kelso, J. A. S., & Haken, H. (1992). Phase transitions in the human brain : spatial mode dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2, 917-939.
- Gaillard, A. W. K. (1993). Comparing the concepts of mental load and stress. *Ergonomics*, 36, 991-1005.
- Gardiner, C. W. (1985). *Handbook of stochastic methods for physics, chemistry, and the natural sciences*. Berlin : Springer-Verlag.
- Garland, H. (1984). Relation of effort-performance expectancy to performance in goal-setting experiments. *Journal of Applied Psychology*, 69, 79-84.
- Gendolla, G. H. E. (1999). Self-relevance of performance, task difficulty, and task engagement assessed as cardiovascular response. *Motivation and Emotion*, 23, 45-66.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin.

- Gilain, C. (1991). La théorie qualitative de Poincaré et le problème de l'intégration des équations différentielles. *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 34, 215-276.
- Haken, H. (1983). *Advanced Synergetics*. Berlin : Springer-Verlag.
- Haken, H. (1984). *Synergetics. An introduction : Non-equilibrium phase transition and self-organization in physics, chemistry, and biology* (3rd edition). Berlin : Springer Verlag.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Haken, H., & Wunderlin, A. (1990). Le chaos déterministe. *La recherche*, 21, 1248-1255.
- Hancock, P. A. (1984). Environmental stressors. In J. S. Warm (Ed.). *Sustained attention in human performance* (pp. 103-142). New-York : John Wiley & Sons.
- Hockey, G. R. J. (1984). Varieties of attentional state : the effects of environment. In R. Parasuraman & D. R. Davies (Eds.), *Varieties of Attention* (pp.449-483). New York : Academic Press.
- Hockey, G. R. J., & Hamilton, P. (1983). The cognitive patterning of stress states. In G. R. J. Hockey (Ed.). *Stress and fatigue in human performance* (pp. 331-362). Chichester : Wiley.
- Holt, K. G., Hamill, J., & Andres, R. O. (1991). Predicting the minimal energy costs of human walking. *Medecine and Science in Sports and Exercise*, 23, 491-498.
- Hoyt, D. F., & Taylor, C. R. (1981). Gait and the energetics of locomotion in horses. *Nature*, 292, 239-240.
- Humphreys, M. S., & Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance : a theory of the relationship between individual differences and information processing. *Psychological Review*, 91, 153-184.

- Jeka, J. J., & Kelso, J. A. S. (1995). Manipulating symmetry in the coordination dynamics of human movement. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 360-374.
- Jones, J. G., & Hardy, L. (1989). Stress and cognitive functioning in sport. *Journal of Sports Sciences*, 7, 41-63.
- Kac, M., & Logan, J. (1979). Fluctuations. In E. W. Montroll & J. L. Lebowitz (Eds.), *Fluctuation phenomena* (pp. 1-60). North-Holland : Elsevier Science Publishers.
- Kahneman, D. (1973). Attention and effort. New-York : Prentice Hall.
- Kay, B. A., Kelso, J. A. S., Saltzman, E. L., & 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. (1977). Motor control mechanisms underlying human movement reproduction. *Journal of Experimental Psychology*, 3, 529-543.
- Kelso, J. A. S. (1981a). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18, 63.
- Kelso, J. A. S. (1981b). Constrasting perspectives on order and regulation in movement. In J. Long & A. Baddeley (Eds.), *Attention and Performance IX* (pp. 437-457). Amsterdam : North-Holland publishing Compagny.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology : Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15, R1000-R1004.
- Kelso, J. A. S. (1994). Elementary coordination dynamics. In S.P. Swinnen, H. Heuer, J. Massion & P. Caesar (Eds.), *Interlimb coordination : Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 301-320). San Diego, CA : Academic Press.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns. The self-organization of brain and behavior*. London : The MIT Press.

- Kelso, J. A. S. (1997). Relative timing in brain and behavior : Some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science, 16*, 453-460.
- Kelso, J. A. S., Buchanan, J. J., DeGuzman, G. C., & Ding, M. (1993). Spontaneous recruitment and annihilation of degrees of freedom in biological coordination. *Physics Letters A, 179*, 364-371.
- Kelso, J. A. S., & DeGuzman, G. C. (1988). Order in time : how the cooperation between the hands informs the design of the brain. *Springer Series in Synergetics, 42*, 180-196.
- Kelso, J. A. S., Buchanan, J. J., & Wallace, S. A. (1991). Order parameters for the neural organization on single, multijoint limb movement patterns. *Experimental Brain Research, 85*, 432-444.
- Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and Performance XII* (pp. 139-169). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Kelso, J. A. S., Ding, M. & Schöner, G. (1993). Dynamic pattern formation : A primer. In L.B. Smith & E. Thelen (Eds.) *A dynamic approach to development* (pp. 13-50). Cambridge, MA : MIT Press.
- Kelso, J. A. S., & Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human multilimb coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 18*, 645-668.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes : theory and data. *Journal of Motor Behavior, 13*, 226-261
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures : II. Empirical lines of convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 49-70). Amsterdam : North-Holland.

- Kelso, J. A.S., & Scholz, J. P. (1985). Cooperative phenomena in biological motion. In H. Haken (Ed.), *Complex systems - operational approaches in neurobiology, physical systems and computers* (pp. 124-149). Berlin : Springer.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological movement. *Physics Letters A*, *118*, 279-284.
- Kelso, J. A. S., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1988). Dynamics governs switching among patterns of coordination in biological movement. *Physics Letters A*, *134*, 8-12.
- Kelso, J.A.S, & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, *7*, 27-46.
- Kelso, J. A. S., Schöner, G., Scholz, J. P., & Haken, H. (1987). Phase-locked modes, phase transitions and component oscillators in biological motion. *Physica Scripta*, *35*, 79-87.
- Kolmogorov, A. N. (1931). Über die analytischen methoden in der wahrscheinlichkeitsrechnung. *Mathematik Annual*, *104*, 415-458.
- Kolmogorov, A. N. (1933). *Grundbegriffe der wahrscheinlichkeitsrechnung*. Ergebnisse der Mathematik, Berlin : Springer.
- Kugler, P. N. (1986). Morphological perspectives on the origin and evolution of movement patterns. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children : Aspects of coordination and control* (pp. 459-525). Dordrecht : Martinus Nijhoff.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures : I. Theoretical lines of convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 3-47). Amsterdam : North-Holland.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ : Erlbaum.

- Kukla, A. (1972). Foundations of an attributional theory of performance. *Psychological Review*, 79, 454-470.
- Lacey, J. L. (1967). Somatic response patterning and stress : Some revisions of activation theory. In M. H. Appley & R. Trumbell (Eds.), *Psychological stress* (pp. 14-37). New-York : Appleton-Century-Crofts.
- Lacquaniti, F., & Soechting, J. F. (1982). Coordination of arm and wrist motion during a reaching task. *The Journal of Neuroscience*, 2, 399-408.
- Langevin, P. (1908). *Comptes rendus*, 146, 530.
- Laplace, P. S. (1814). *Essai Philosophique sur les probabilité*. Courcier : Paris.
- Laurent, M. (1991). Visual cues and processes involved in goal-directed locomotion. In A.E. Patla (Eds.), *Adaptability of human gait* (pp. 99-123). North Holland : Elsevier Science Publisher B.V.
- Lavenda, B. (1987). Le mouvement brownien. In *L'ordre du chaos* (pp. 8-17), Bibliothèque pour la science : Diffusion belin.
- Lee, T. D. (1998). Hot topics in motor control and learning : On the dynamics of motor learning research. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69, 334-337.
- Lee, T. D., Blandin, Y., & Proteau, L. (1996). Effects of task instructions and oscillation frequency on bimanual coordination. *Psychological Research*, 59, 100-106.
- Lee, T. D., & Swinnen, S. P. (1993). Three legacies of Bryan and Harter : Automaticity, variability and change in skilled performance. In J. L. Starkes & F. Allard (Eds.), *Cognitive issues in motor expertise* (pp. 295-315). Amsterdam : Elsevier.
- Lee, T. D., Swinnen, S. P., & Verschueren (1995). Relative phase alterations during bimanual skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 27, 263-274.
- Léger, L., & Gadoury, C. (1989). Validity of the 20 m shuttle run test with 1 min stages to predict VO₂ max in adults. *Canadian Journal of Sports Sciences*, 14, 21-26.

- Léger, L., Mercier, D., Gadoury, C., & Lambert, J. (1988). The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. *Journal of Sports Sciences*, 6, 93-101.
- Lindsley, D. B. (1960). Attention, consciousness, sleep and wakefulness. In J. Field (Ed.), *Handbook of physiology : Neurophysiology* (pp. 1553-1593). Washington DC : American Physiological Society.
- Locke, E. A. (1968). Toward a theory of task motivation and incentives. *Organizational Behavior and Human Performance*, 3, 157-189.
- Locke, E. A. (1991). Goal theory vs. control theory : Constrasting approaches to understanding work motivation. *Motivation and Emotion*, 15, 9-28.
- Locke, E. A., Cartledge, N., & Koeppel, J. (1968). Motivational effects of knowledge of results : A goal setting phenomenon. *Psychological Bulletin*, 70, 474-485.
- Locke, E. A., & Latham, G. P. (1985). The application of goal setting to sports. *Journal of Sport psychology*, 7, 205-222.
- Locke, E. A., Shaw, K. N., Saari, L. M., & Latham, G. P. (1981). Goal setting and task performance : 1969-1980. *Psychological Bulletin*, 90, 125-152.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- Lyapunov, A. M. (1992). *The general problem of the stability of motion*. London : Taylor & Francis Ltd.
- Mace, R. (1979). Physiological arousal in climbers. *Physical Education Review*, 2, 141-149.
- Malmö, R. B. (1959). Activation : A neuropsychological dimension. *Psychological Review*, 66, 367-386.
- Mandler, G. (1975). *Mind and emotion*. New-York : John Wiley & Sons.
- Martens, R. (1976). Arousal and motor performance. *Exercise and Sport Sciences Review*, 2, 135-185.

- Martens, R., Vealey, R. S., & Burton, D. (1990). *Competitive anxiety in sport*. Champaign, Ill. : Human Kinetics Books.
- McAuley, E. (1985). State anxiety : Antecedent of result of motor performance. *Journal of Sport Behavior*, 8, 71-77.
- Melo, F., & Laurent, M. (1994). Effet de l'état émotionnel sur le contrôle d'un geste de précision. In M. Audiffren & G. Minvielle (Eds.), *Psychologie des Pratiques Physiques et Sportives. Actes du Congrès International de la Société Française de Psychologie du Sport* (pp. 249-250). Poitiers : Presses de L'UFR APS de l'Université de Poitiers.
- Mitra, S., Amazeen, P. G., & Turvey, M. T. (1998). Intermediate motor learning as decreasing active (dynamical) degrees of freedom. *Human Movement Science*, 17, 17-65.
- Montagne, G., Cornus, S., Glize, D., Quaine, F., & Laurent, M. (2000). A 'perception-action coupling' type of control in long-jumping. *Journal of Motor Behavior*, 32, 37-44.
- Morris, L. W., & Liebert, R. M. (1973). Effects of negative feedback, threat of shock, and trait anxiety on the arousal of two components of anxiety. *Journal of Counselling Psychology*, 20, 321-326.
- Morrison, E. W., & Weldon, E. (1990). The impact of an assigned performance goal on feedback seeking behavior. *Human Performance*, 3, 37-50.
- Mottet, D., & Bootsma, R. J. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics*, 80, 235-245.
- Näätänen, R. (1973). The invested-U relationship between activation and performance : a critical review. In S. Kornblum (Ed.). *Attention and Performance IV* (pp. 155-174). New-York : Academic Press.
- Navon, D., & Gopher, D. (1979). On the economy of the human processing system. *Psychological Review*, 86, 214-255.

- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of co-ordination. In M.G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.), *Motor in Children : Aspects of Co-ordination and Control* (pp. 341-360). Dordrecht : Martinus Nijhoff.
- Newell, K. M. (1991). Motor skill acquisition. *Annual Review of Psychology*, 42, 213-237.
- Norman, D. A., & Bobrow, D. J. (1975). On data-limited and resource-limited processes. *Cognitive Psychology*, 7, 44-64.
- Nourrit, D., Delignières, D., Deschamps, T., & Lauriot, B. (2000). *Evolution des coordinations motrices avec apprentissage : les stratégies de forçage sur le simulateur de ski*. Papier présenté au Congrès de la Société Française de la Psychologie du Sport. Paris, 7-10 Juillet.
- Nourrit, D., Deschamps, T., Lauriot, B., Caillou, N., & Delignières, D. (2000). The effects of required amplitude and practice on frequency stability and efficiency in a cyclical task. *Journal of Sports Sciences*, 18, 201-212.
- Paas, F. G., & Adam, J. J. (1991). Human information processing during progressive exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 63, 1067-1072.
- Parisi, G. (1999). Complex Systems : a Physicist's Viewpoint. *Physica A*, 263, 557-564.
- Parrochia, D. (1997). *Les grandes révolutions scientifiques du XX^e siècle*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Peper, C. L. E., & Beek, P. J. (1998a). Distinguishing between the effects of frequency and amplitude on interlimb coupling in tapping a 2:3 polyrhythm. *Experimental Brain Research*, 118, 78-92.
- Peper, C. L. E., & Beek, P. J. (1998b). Are frequency-induced transitions in rhythmic coordination mediated by a drop in amplitude? *Biological Cybernetics*, 79, 291-300.

- Peper, C. L. E., & Beek, P. J. (1999). Modeling rhythmic interlimb coordination : the roles of movement amplitude and time delays. *Human Movement Science, 18*, 263-280.
- Peper, C. L. E., Beek, P. J., & Van Wieringen, 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.
- Poincaré, H (1908). *Science et méthode*. Paris : Flammarion.
- Poincaré, H. (1987). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. Paris : Blanchard, J.J. Gabay.
- Prabhu, N. U. (1965). *Stochastic processes. Basic theory and its applications*. New York : Mac millan.
- Prigogine, I. (1994). *Les lois du chaos*. Paris : Champs-Flammarion.
- Prigogine, I, & Stengers, I. (1992). *Entre le temps et l'éternité*. Manchecourt (France) : Flammarion.
- Provins, K. A., Glencross, D. J., & Cooper, C. J. (1973). Thermal stress and arousal. *Ergonomics, 16*, 61-97.
- Rajasekar, S., Valsakumar, M. C., & Raj, S. P. (1998). Noise-induced jumps in two coupled Duffing oscillators. *Physica A, 261*, 417-434.
- Rayleigh, J. W. S. (1945). *Theory of sound*. New-York : Dover (travail original publié en 1877).
- Revelle, W., Anderson, K. J., & Humphreys, M. S. (1987). Empirical tests and theoretical extensions of arousal-based theories of personality. In J. Strelau & H. J. Eysenck (Eds.), *Personality dimensions and arousal* (pp. 17-36). New York : Plenum Press.

- Revelle, W., Humphreys, M. S., Simon, L., & Gilliland, K. (1980). The interactive effect of personality, time of day, and caffeine : a test of the arousal model. *Journal of Experimental Psychology : General*, *109*, 1-31.
- Roberts, G. C. (1991). Personality, motivation and motor behavior. In J. Bilard & M. Durand (Eds.), *Sport et Psychologie* (pp. 221-227). Paris : EPS/SFPS.
- Rosenblatt, M. (1974). *Random processes*. New York : Springer-Verlag.
- Roazanov, Y.A. (1982). *Markov random fields*. New-York : Springer-Verlag.
- Ruelle, D. (1991). *Hasard et chaos*. Paris : Editions Odile Jacobs.
- Ruelle, D. (1987). Déterminisme et prédictibilité. In *L'ordre du chaos* (pp. 136-145), Bibliothèque pour la science : diffusion Belin.
- Saltzman, E. L., & Kelso, J. A. S. (1987). Skilled actions : A task-dynamic approach. *Psychological Review*, *94*, 84-106.
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, *53*, 64-97.
- Sanders, A. F. (1990). Issues and trends in debate on discrete versus continuous processing of information. *Acta Psychologica*, *74*, 123-167
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*, 225-260.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning*. Champaign, IL : Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., Beek, P. J., Treffner, P. J., & Turvey, M.T. (1991). Dynamical substructure of coordinated rhythmic movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *17*, 635-651.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movement between people. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *16*, 227-247.

- Schmidt, R. C., Shaw, B. K., & Turvey, M. T. (1993). Coupling dynamics in interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *19*, 397-415.
- Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1995). Models of interlimb coordination : Equilibria, local analyses, and spectral patterning. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *21*, 432-443.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1989). A quantitative approach to understanding the formation and change of coordinated movements patterns. *Journal of Motor Behavior*, *21*, 122-144.
- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, *22*, 98-124.
- Scholz, J. P., Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1987). Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion : Critical slowing down and switching time. *Physics Letters A*, *123*, 390-394.
- Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transition in human hand movement. *Biological Cybernetics*, *53*, 247-257.
- Schöner, G., Jiang, W. Y., & Kelso, J. A. S. (1990). A synergetic theory of quadrupedal gaits and gaits transitions. *Journal of Theoretical Biology*, *142*, 359-391.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988a). A dynamic pattern theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, *135*, 501-524.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988b). Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, *239*, 1513-1520.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988c). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. I. Relative phase dynamics. *Biological Cybernetics*, *58*, 71-80.

- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988d). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. II. Component oscillator dynamic. *Biological Cybernetics*, 58, 81-89.
- Schöner, G., Zanone, P., & Kelso, J. A. S. (1992). Learning as change of coordination dynamics : theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, 24, 29-48.
- Serrien, D. J., & Swinnen, S. P. (1999). Intentional switching between behavioral patterns of homologous and nonhomologous effector combinations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 25, 645-668.
- Smith, M., & Lee, C. (1992). Goal setting and performance in a novel coordination task : mediating mechanisms. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 14, 169-176.
- Soechting, J. F., & Lacquaniti, F. (1981). Invariant characteristics of pointing movement in man. *The Journal of Neurosciences*, 1, 710-720.
- Spielberger, C. D., Gorsuch, R. L., & Lushene, R. L. (1970). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. Palo Alto : Consulting Psychologists.
- Sternad, D., Saltzman, E. L., & Turvey, M. T. (1998). Interlimb coupling in a simple serial behavior : A task dynamic approach. *Human Movement Science*, 17, 393-433.
- Sternad, D., Turvey, M. T., & Saltzman, E. L. (1999a). Dynamics of 1:2 Coordination : Generalizing Relative Phase to n:m Rhythms. *Journal of Motor Behavior*, 31, 207-223.
- Sternad, D., Turvey, M. T., & Saltzman, E. L. (1999b). Dynamics of 1:2 Coordination : Sources of Symmetry Breaking. *Journal of Motor Behavior*, 31, 224-235.
- Sternad, D., Turvey, M. T., & Saltzman, E. L. (1999c). Dynamics of 1:2 Coordination : Temporal Scaling, Latent 1:1, and Bistability. *Journal of Motor Behavior*, 31, 236-247.

- Sternad, D., Turvey, M.T., & Schmidt, R.C. (1992). Average phase difference theory and 1:1 phase entrainment in interlimb coordination. *Biological Cybernetics*, 67, 223-231.
- Sternberg, S. (1969). On the discovery of processing stages : some extension of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276-315.
- Stewart, I. (1998). *Dieu joue-t-il aux dés? Les mathématiques du chaos*. Manchecourt (France) : Flammarion.
- Swinnen, S. P., Heuer, H., Massion, J., & Casaer, P. (1994). *Interlimb coordination : Neural, dynamical and cognitive constraints*. San Diego, CA : Academic Press.
- Swinnen, S., Jardin, K., & Meulenbroek, R. (1996). Between-limb asynchronies during bimanual coordination : effects of manual dominance and attentional cueing. *Neuropsychologica*, 34, 1203-1213.
- Swinnen, S. P., Walter, C. B., Serrien, D. J., & Vandendriessche, C. (1992). The effect of movement speed on upper-limb coupling strength. *Human Movement Science*, 11, 615-636.
- Temprado, J. J., Zanone, P. G., Monno, A., & Laurent, M. (1999). Attentional load associated with performing and stabilizing preferred bimanual patterns. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 25, 1-16.
- Terborg, J. R. (1976). The motivational components of goal setting. *Journal of Applied Psychology*, 61, 613-624.
- Thom, R. (1980). *Modèles mathématiques de la morphogénèse*. Paris : Christian Bourgeois.
- Tomprowski, P.D., & Ellis, N. R. (1986). Effects of exercise on cognitive process : A review. *Psychological Bulletin*, 99, 338-346.
- Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1995). Handedness and the asymmetric dynamics of bimanual rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 21, 318-333.

- Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1996). Symmetry, broken symmetry, and handedness in bimanual coordination dynamics. *Experimental Brain research*, *107*, 463-478.
- Tubbs, M. E. (1986). Goal-setting : A meta-analytic examination of the empirical evidence. *Journal of Applied Psychology*, *71*, 474-483.
- Tuller, B., & Kelso, J. A. S. (1989). Environmentally-specified patterns of movement coordination in normal and split-brain subjects. *Experimental Brain Research*, *75*, 306-316.
- Turvey, M. T., Holt, K. G., Obusek, J., Salo, A., & Kugler, P. N. (1996). Adiabatic transformability hypothesis of human locomotion. *Biological Cybernetics*, *74*, 107-115.
- Turvey, M. T., & Kugler, P. N. (1984). A comment on equating information with symbol strings. *American Journal of Physiology : Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *15*, R925-R927.
- Turvey, M. T., Roseblum, L. D., Schmidt, R. C., & Kugler, P. N. (1986). Fluctuations and phase symmetry in coordinated rhythmic movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *12*, 564-583.
- Turvey, M. T., & Schmidt, R. C. (1994). A low-dimensional nonlinear dynamic governing interlimb rhythmic coordination. In S.P. Swinnen, H. Heuer, J. Massion & P. Caesar (Eds.), *Interlimb coordination : Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 278-301). San Diego, CA : Academic Press.
- Van der Pol, B. (1922). On oscillation hysteresis in a triode generator with two degrees of freedom. *Philosophical Magazine*, *43*, 700-719.
- Van Emmerik, R. E. A., Wagenaar, R. C., & Wolters, E. C. (1993). Dynamics of movement coordination in Parkinson's disease. In E. C. Wolters & P. Scheltens (Eds.), *Mental dysfunction in Parkinson's disease* (pp. 69-91). Dordrecht : ICG Printing.
- Velarde, M., & Normand, C. (1987). La convection. In *L'ordre du chaos* (pp. 114-127), Bibliothèque pour la science : diffusion Belin.

- Vereijken, B. (1991). *The dynamics of skill acquisition*. Ph.D. thesis. Vrije Universiteit, Amsterdam : Meppel, Krips Repro.
- Vereijken, B., Van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behaviour*, 24, 133-142.
- Vereijken, B., & Whiting, H. T. A. (1990). In defence of discovery learning. *Canadian Journal of Sport Science*, 15, 99-106.
- Vereijken, B., Whiting, H. T. A., & Beek, W. J. (1992). A dynamical systems approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45A, 323-344.
- Von Holst, E. (1973). Relative coordination as a phenomenon and a method of analysis of central nervous function. In R. Martin (Ed.), *The collected papers of Erich Von Holst* (pp. 33-135). Coral Gables, FL : University of Miami (papier original publié en 1939).
- Wagenaar, R. C., & Van Emmerick, R. E. A. (1994). Dynamics of pathological gait. *Human Movement Science*, 13, 441-471.
- Walter, C. (1998). Hot topics in motor control and learning. An alternative view of dynamical systems concepts in motor control and learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69, 326-333.
- Walter, C. B., Lee, T. D., & Sternad, D. (1998). Hot topics in motor control and learning : Introduction. The dynamic systems approach to motor control and learning : promises, potential limitations, and future directions. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69, 316-318.
- Walter, C. B., Swinnen, S. P., Corcos, D. M., Pollatou, E., & Pan, H.-Y. (1997). Coping with systematic bias during bilateral movement. *Psychological Research*, 60, 202-213.

- Weinberg, R. S., Bruya, L., Jackson, A., & Garland, H. (1987). Goal difficulty and endurance performance : A challenge to the goal attainability assumption. *Journal of Sport Behavior, 10*, 82-92.
- Weinberg, R. S., Fowler, C., Jackson, A., Bagnall, J., & Bruya, L. (1991). Effect of goal difficulty on motor performance : A replication across tasks and subjects. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 13*, 160-173.
- Weinberg, R. S., & Weigand, D. (1993). Goal Setting in sport and exercise: A reaction to Locke. *Journal of Sport and Exercise Psychology, 15*, 88-96.
- Welford, A. T. (1967). Single channel operation in the brain. *Acta Psychologica, 27*, 5-22.
- Wilkinson, R. T. (1961). Interaction of lack of sleep with knowledge of results, repeated testing and individual differences. *Journal of Experimental Psychology, 6*, 263-271.
- Wilkinson, R. T. (1963). Interaction of noise with knowledge of results and sleep deprivation. *Journal of Experimental Psychology, 66*, 332-337.
- Wilkinson, R. T. (1964). Effects of up to 60 hours sleep deprivation in different types of work. *Ergonomics, 7*, 175-186.
- Wright, P. M. (1991). Goals as mediators of the incentive-performance relationship : A review and NPI theory analysis. *Human Resource Management Review, 1*, 1-22.
- Wright, P. M., & Kacmar, K. M. (1995). Mediating roles of self-set goals, goal commitment, self-efficacy and attractiveness in the incentive-performance relation. *Human Performance, 8*, 263-296.
- Wright, R. A., Wadley, V. G., Pharr, R. P., & Butler, M. (1994). Interactive influence of self-reported ability and avoidant task demand on anticipatory cardiovascular responsivity. *Journal of Research in Personality, 28*, 68-86.

- 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.
- Wuyts, I. J., Summers, J. J., Carson, R. G., Byblow, W. D., & Semjen, A. (1996). Attention as a mediating variable in the dynamics of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 15, 877-897.
- Yamanishi, J., Kawoto, M., & Susuki, R. (1979). Studies on human finger tapping neural networks by phase transition curves. *Biological Cybernetics*, 33, 199-208.
- Yamanishi, J., Kawoto, M., & Susuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, 37, 219-225.
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit formation. *Journal of Comparative and Neurological Psychology*, 18, 459-482.
- 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. (1994). The coordination dynamics of learning : Theoretical structure and experimental agenda. In S. P. Swinnen, H. Heuer, J. Massion & P. Caesar (Eds.), *Interlimb coordination : Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 461-490). San Diego, CA : Academic Press.
- 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.

Table des matières

Sommaire	p. 2
Introduction	p. 5
Approche synergétique des systèmes dynamiques	p. 9
1- Introduction	p. 9
2- Système dynamique	p. 10
3- Importance qualitative de la non-linéarité	p. 12
4- La formation spontanée d'états ordonnés	p. 13
5- Degrés de liberté et complexité	p. 14
6- Les équations d'état	p. 15
7- Portrait de phase	p. 16
<i>7-1 Attracteurs</i>	p. 16
<i>7-2 Repellants</i>	p. 17
<i>7-3 Points-col</i>	p. 18
8- Les propriétés stochastiques d'un système dynamique	p. 18
9- Conclusion	p. 19
Approche dynamique des coordinations motrices	p. 21
1- Introduction	p. 21
2- Le système de contraintes	p. 22
3- Paradigme de la tâche bimanuelle d'oscillations rythmiques	p. 24
<i>3-1 Scott Kelso, le précurseur</i>	p. 24
3-1-1 Les patterns comportementaux préférentiels	p. 24
3-1-2 Confirmations expérimentales	p. 26
3-1-3 La transition de phase	p. 27

3-2 Stabilité, perte de stabilité, et fluctuations des coordinations bimanuelles	p. 29
3-2-1 Fluctuations critiques (<i>critical fluctuations</i>)	p. 29
3-2-2 Ralentissement critique (<i>critical slowing down</i>)	p. 30
4- Modèles théoriques de transition de phase des coordinations bimanuelles	p. 31
4-1 Le modèle “ déterministe ” de Haken, Bunz et Kelso (1985)	p. 31
4-1-1 Conditions périodiques et symétriques	p. 31
4-1-2 La fonction de potentiel, $V(\phi)$	p. 32
4-2 Le modèle “ stochastique ” de Schöner, Haken et Kelso (1986)	p. 34
4-2-1 L'équation stochastique	p. 34
4-2-2 Incidences stochastiques	p. 35
4-2-2-1 Le temps de relaxation	p. 35
4-2-2-2 Le temps d'observation	p. 35
4-2-2-3 Le temps d'équilibration	p. 36
4-2-2-4 Conclusions	p. 37
4-3 Le modèle cycle limite de Kay, Kelso, Saltzman et Schöner (1987)	p. 38
4-3-1 Les oscillateurs non linéaires auto-entretenus	p. 38
4-3-1-1 L'oscillateur type Van der Pol (1922)	p. 39
4-3-1-2 L'oscillateur type Rayleigh (1877/1945)	p. 39
4-3-2- Modélisation des oscillateurs de la tâche bimanuelle	p. 39
4-4 Le modèle des oscillateurs couplés de Haken, Kelso et Bunz (1985)	p. 41
4-4-1 Introduction	p. 41
4-4-2 Modèle d'oscillateurs couplés selon les <i>dérivées temporelles</i>	p. 42
4-4-3 Modèle d'oscillateurs couplés selon les <i>délais temporels</i>	p. 42
4-4-4 Conclusions	p. 43
4-5 Extensions du modèle stochastique de Schöner, Haken et Kelso (1986)	p. 44
4-5-1 L'effet magnétique de Von Holst (1939/1973)	p. 44

4-5-2 Modélisation des fréquences propres des oscillateurs	p. 45
4-6 Conclusions	p. 46
5- L'information comportementale	p. 47
5-1 Influence théorique de l'information comportementale	p. 47
5-2 Interprétations	p. 48
6- Conclusions	p. 50
Partie expérimentale	p. 53
1- Influence des intentions sur le phénomène de transition de phase	
 dans la tâche de coordinations bimanuelles	p. 53
1- 1 Introduction	p. 53
1- 2 Méthode	p. 58
1-2-1 Sujets	p. 58
1-2-2 Appareillage	p. 58
1-2-3 Procédure	p. 58
1-2-3-1 Familiarisation avec la tâche bimanuelle	p. 59
1-2-3-2 Condition sans objectif	p. 59
1-2-3-3 Condition avec objectif	p. 60
1-2-3-4 Analyses des données et traitements statistiques	p. 60
1- 3 Résultats	p. 63
1-3-1 Effet de la condition sur la fréquence critique	p. 63
1-3-2 Effet de la condition sur la variabilité pré-transition du pattern 180°	p. 63
1-3-2-1 A fréquence identique	p. 63
1-3-2-2 A fréquence relative	p. 64
1- 4 Discussion	p. 65
1-4-1 Aspects méthodologiques	p. 65

1-4-2 Interprétation des résultats	p. 66
<i>1- 5 Conclusion</i>	p. 69
2- Influence de la force de l'intention sur le niveaux de fluctuations	
des patterns spontanés de la tâche de coordination bimanuelle	p. 71
<i>2-1 Introduction</i>	p. 71
2-1-1 L'effort : l'allocation et la disponibilité des ressources	p. 72
2-1-2 Effet hypothétique de l'effort, l'allocation des ressources	p. 74
<i>2- 2 Méthode</i>	p. 76
2-2-1 Sujets	p. 76
2-2-2 Appareillage	p. 76
2-2-3 Procédure	p. 76
2-2-3-1 Première session	p. 76
2-2-3-2 Sessions expérimentales	p. 77
2-2-3-3 Analyses des données et traitements statistiques	p. 78
<i>2-3 Résultats</i>	p. 80
2-3-1 Fréquences critiques des sujets	p. 80
2-3-2 Fréquence attendue	p. 80
2-3-3 Moyenne de la phase relative	p. 80
2-3-4 Variabilité de la phase relative	p. 80
2-3-4-1 Le pattern en phase	p. 80
2-3-4-2 Le pattern en anti-phase	p. 82
2-3-5 Erreur constante absolue de la phase relative	p. 82
<i>2-4 Discussion</i>	p. 84
2-4-1 Aspects méthodologiques	p. 85
2-4-2 Interprétation des résultats	p. 86
<i>2-5 Conclusion</i>	p. 90

3- Détermination du niveau d'investissement intentionnel au cours de la réalisation du pattern en anti-phase à hautes fréquences d'oscillation	p. 92
<i>3-1 Introduction</i>	p. 92
3-1-1 L'approche probabiliste	p. 93
3-1-2 Détermination de la force intentionnelle, c_{int}	p. 95
3-1-2-1 Les processus stochastiques	p. 96
3-1-2-2 Les processus de Markov à transition continue : l'équation de Fokker-Planck	p. 97
3-1-2-3 Modalité de calculs de la force intentionnelle, c_{int}	p. 99
<i>3-2 Méthode</i>	p.101
3-2-1 Sujets, appareillage et procédure	p.101
3-2-2 Analyses des données et traitements statistiques	p.101
<i>3-3 Résultats</i>	p.102
3-3-1 Les paramètres a et b , fonction de la fréquence proposée	p.102
3-3-2 Le paramètre c_{int} , la force de l'intention	p.103
3-3-3 Effets des instructions sur la variabilité du pattern en anti-phase	p.105
<i>3-4 Discussion</i>	p.106
3-4-1 Interprétation des résultats	p.106
3-4-2 La difficulté perçue, une nouvelle perspective?	p.111
<i>3-5 Conclusion</i>	p.115
4- Influence de l'activation sur le phénomène de transition de phase et la stabilité des coordinations bimanuelles	p.117
<i>4-1 Introduction</i>	p.117
<i>4-2 Méthode</i>	p.121
4-2-1 Sujets	p.121
4-2-2 Appareillage	p.121

4-2-3 Procédure	p.122
4-2-3-1 Première session	p.122
4-2-3-2 Sessions expérimentales	p.123
4-2-3-2-1 Hypothèses sur la transition de phase	p.123
4-2-3-2-2 Hypothèses sur la stabilité des patterns spontanés	p.124
4-2-3-3 Analyses des données et traitements statistiques	p.124
4-2-3-3-1 Hypothèses sur la transition de phase	p.124
4-2-3-3-2 Hypothèses sur la stabilité des patterns spontanés	p.125
<i>4-3 Résultats</i>	p.126
4-3-1 Effets de l'exercice physique sur la transition de phase	p.126
4-3-1-1 Fréquence cardiaque et difficulté perçue	p.126
4-3-1-2 Fréquence critique	p.126
4-3-1-3 Variabilité pré-transition à même fréquence	p.127
4-3-1-4 Variabilité pré-transition à fréquence relative	p.124
4-3-2 Effets de l'exercice physique sur la stabilité des attracteurs	p.128
4-3-2-1 Fréquence cardiaque et difficulté perçue	p.128
4-3-2-2 Variabilité de la phase relative	p.129
<i>4-4 Discussion</i>	p.129
4-4-1 Aspects méthodologiques	p.129
4-4-2 Interprétation des résultats	p.132
<i>4-5 Conclusion</i>	p.134
5- Influence d'une situation stressante sur les fonctions de raideur et d'amortissement caractéristiques des coordinations motrices d'une tâche complexe, le simulateur de ski	p.136
5-1 Introduction	p.136
5-2 Méthode	p.139

5-2-1 Sujets	p.139
5-2-2 Appareillage	p.139
5-2-3 Procédure	p.139
5-2-4 Analyses des données et traitements statistiques	p.140
<i>5-3 Résultats</i>	p.141
<i>5-4 Discussion</i>	p.144
<i>5-5 Conclusion</i>	p.147
Conclusion générale	p.148
Bibliographie	p.156
Table des matières	p.181