



**HAL**  
open science

# Approche dynamique de l'apprentissage de coordinations posturales

Elise Faugloire

► **To cite this version:**

Elise Faugloire. Approche dynamique de l'apprentissage de coordinations posturales. Sciences de l'Homme et Société. Université Paris Sud - Paris XI, 2005. Français. NNT : . tel-00128845

**HAL Id: tel-00128845**

**<https://theses.hal.science/tel-00128845>**

Submitted on 2 Feb 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS SUD 11  
UFR STAPS

**THÈSE**

Présentée

Pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences du Sport, de la Motricité et  
du Mouvement Humain**

par

**Elise FAUGLOIRE**

**APPROCHE DYNAMIQUE DE  
L'APPRENTISSAGE DE COORDINATIONS  
POSTURALES**

Soutenue le 10 février 2005 devant la commission d'examen composée de

<b>Benoît BARDY</b>	Professeur, Université Paris Sud 11	<i>Directeur</i>
<b>Blandine BRIL</b>	Directrice d'études, EHESS	<i>Examinatrice</i>
<b>Vincent NOUGIER</b>	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	<i>Rapporteur</i>
<b>Stephan SWINNEN</b>	Professeur, Université de Leuven	<i>Examineur</i>
<b>Pier-Giorgio ZANONE</b>	Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse 3	<i>Rapporteur</i>



UNIVERSITE PARIS SUD 11  
UFR STAPS

**THÈSE**

Présentée

Pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences du Sport, de la Motricité et  
du Mouvement Humain**

par

**Elise FAUGLOIRE**

**APPROCHE DYNAMIQUE DE  
L'APPRENTISSAGE DE COORDINATIONS  
POSTURALES**

Soutenue le 10 février 2005 devant la commission d'examen composée de

<b>Benoît BARDY</b>	Professeur, Université Paris Sud 11	<i>Directeur</i>
<b>Blandine BRIL</b>	Directrice d'études, EHESS	<i>Examinatrice</i>
<b>Vincent NOUGIER</b>	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble 1	<i>Rapporteur</i>
<b>Stephan SWINNEN</b>	Professeur, Université de Leuven	<i>Examineur</i>
<b>Pier-Giorgio ZANONE</b>	Professeur, Université Paul Sabatier, Toulouse 3	<i>Rapporteur</i>

# REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Centre de Recherche en Sciences du Sport de l'Université de Paris Sud 11. Je tiens à adresser des remerciements tout particuliers à Benoît Bardy pour son encadrement et sa disponibilité au cours de ce travail, ainsi que pour ses qualités humaines. J'ai eu beaucoup de chance d'effectuer ma formation scientifique sous sa direction.

Merci à Blandine Bril, Vincent Nougier, Stephan Swinnen et Pier-Giorgio Zanone qui ont pris le temps de lire et d'évaluer ce document.

Je remercie également Thomas Stoffregen pour sa collaboration scientifique sur les articles et pour l'expérience post-doctorale qu'il m'offre pour l'année à venir.

Un grand merci aux participants qui ont si gentiment accepté de consacrer plusieurs heures pour ces expérimentations.

Travailler au laboratoire du CRESS m'a permis de rencontrer des gens formidables qui m'ont beaucoup appris. Je remercie l'ensemble des Professeurs, Maîtres de Conférence, et membres du personnel pour leurs conseils et leur gentillesse. L'ambiance sympathique de la salle des doctorants va beaucoup me manquer. Je pense particulièrement à Antoine, Delphine, Jérôme, Mohamed, Paul, et Zak pour tous ces bons moments passés ensemble.

A mes parents et ma famille. A Bruno.

Une page de remerciement peut sembler convenue et académique, et je souhaite sincèrement avoir réussi à communiquer mes sentiments et ma reconnaissance largement au-delà de cette trace écrite.

# TABLE DES MATIERES

Avant-propos viii

---

## **Introduction** **1**

---

## **CHAPITRE 1. CADRE THEORIQUE** **4**

### **1.1. Approche Dynamique du Contrôle Moteur** **5**

1.1.1. Qu'est-ce que la coordination ? 5

1.1.2. Opposition de la théorie dynamique au regard des approches classiques 6

1.1.3. Système de contraintes et Auto-organisation 7

1.1.4. Systèmes dissipatifs et Attracteurs comportementaux 9

1.1.5. Variable collective 11

1.1.6. Le concept de dynamique intrinsèque 13

1.1.7. Les paramètres agissant sur la dynamique intrinsèque 14

1.1.8. Travaux expérimentaux 15

1.1.9. Modélisation de la dynamique de coordination 17

1.1.10. Influences sur les tendances de coordination préférées 20

### **1.2. Approche Dynamique de l'Apprentissage Moteur** **22**

1.2.1. Perspectives théoriques 22

1.2.1.1. Fondements de l'approche 22

1.2.1.2. Modélisation de l'apprentissage 24

1.2.1.3. Prédictions théoriques 26

1.2.1.3.1. Evolution des caractéristiques du patron produit  
durant l'apprentissage 27

1.2.1.3.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ? 29

1.2.1.3.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation  
des attracteurs initiaux 30

1.2.1.3.4. Transfert d'apprentissage 31

1.2.1.4. Questions engendrées par ces principes théoriques 33

1.2.1.4.1. L'expertise : la spécificité empêche-t-elle la flexibilité ?	33
1.2.1.4.2. De quoi dépend la capacité à apprendre ?	34
1.2.1.4.3. Importance des différences inter-individuelles	34
<u>1.2.2. Observations expérimentales</u>	35
1.2.2.1. Tableau de présentation	36
1.2.2.2. Constats généraux	43
1.2.2.3. Résultats obtenus et différences selon les études	44
1.2.2.3.1. Evolution des caractéristiques du patron produit durant l'apprentissage	45
1.2.2.3.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ?	46
1.2.2.3.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation des attracteurs initiaux	49
1.2.2.3.4. Transfert d'apprentissage	51
1.2.2.4. Bilan et discussion	54
<b>1.3. Les Coordinations Posturales</b>	<b>57</b>
<u>1.3.1. Les stratégies neuromusculaires</u>	58
<u>1.3.2. Approche dynamique des coordinations posturales</u>	60
1.3.2.1. Emergence des coordinations posturales et système de contraintes	61
1.3.2.2. Les transitions posturales	66
1.3.2.3. Conclusion	69
<u>1.3.3. Spécificités des coordinations posturales</u>	70
1.3.3.1. Maintien de l'équilibre	70
1.3.3.2. Implication de la totalité du corps	71
1.3.3.3. Système d'articulations asymétrique	72
1.3.3.4. Articulations couplées	72
1.3.3.5. Patron de coordination spontané	72
<b>1.4. Apprentissage de coordinations posturales</b>	<b>73</b>
<u>1.4.1. Objectifs de l'étude</u>	73
<u>1.4.2. Concernant l'analyse des données</u>	76
1.4.2.1. Calcul de la phase relative	76
1.4.2.2. Traitement statistique	79

<b><u>CHAPITRE 2. COORDINATIONS SPONTANÉES ET APPRENTISSAGE</u></b>	<b>81</b>
<b>2.1. Introduction</b>	<b>82</b>
<b>2.2. Expérimentation 1</b>	<b>85</b>
<u>2.2.1. Méthode</u>	85
2.2.1.1. Participants	85
2.2.1.2. Tâches et Dispositif expérimental	85
2.2.1.3. Procédure	88
2.2.1.4. Variables dépendantes	91
<u>2.2.2. Résultats</u>	92
2.2.2.1. Coordinations spontanées lors du pré-test	93
2.2.2.2. Session d'apprentissage	93
2.2.2.3. Conséquences de l'apprentissage sur les patrons spontanés	100
<b>2.3. Expérimentation 2</b>	<b>105</b>
<u>2.3.1. Méthode</u>	106
2.3.1.1. Participants	106
2.3.1.2. Tâches et Dispositif expérimental	106
2.3.1.3. Procédure	106
2.3.1.4. Variables dépendantes	108
<u>2.3.2. Résultats</u>	109
2.3.2.1. Coordination spontanée lors du pré-test	109
2.3.2.2. Session d'apprentissage	110
2.3.2.3. Conséquences de l'apprentissage sur les patrons spontanés	113
2.3.2.4. Amplitude des mouvements de la tête lors de la tâche de poursuite de cible	118
<b>2.4. Discussion Générale</b>	<b>119</b>
<b><u>CHAPITRE 3. COORDINATIONS REQUISES ET APPRENTISSAGE</u></b>	<b>126</b>
<b>3.1. Expérimentation 3</b>	<b>129</b>
<u>3.1.1. Introduction</u>	129
<u>3.1.2. Méthode</u>	130
3.1.2.1. Participants	130



3.1.2.2. Tâches et Dispositif expérimental	130
3.1.2.3. Protocole	132
3.1.2.4. Variables dépendantes	134
<u>3.1.3. Résultats</u>	135
<u>3.1.4. Discussion</u>	141
<b>3.2. Expérimentation 4</b>	<b>143</b>
<u>3.2.1. Introduction</u>	143
<u>3.2.2. Méthode</u>	144
3.2.2.1. Participants	144
3.2.2.2. Dispositif expérimental	145
3.2.2.3. Tâches et procédure	146
3.2.2.4. Variables dépendantes	148
<u>3.2.3. Résultats</u>	149
3.2.3.1. Amplitude des articulations	149
3.2.3.2. Session d'apprentissage	150
3.2.3.3. Sessions de test	152
<u>3.2.4. Discussion</u>	160
<b>3.3. Expérimentation 5</b>	<b>162</b>
<u>3.3.1. Introduction</u>	162
<u>3.3.2. Méthode</u>	164
3.3.2.1. Participants	164
3.3.2.2. Tâches et Dispositif expérimental	164
3.3.2.3. Procédure	167
3.3.2.4. Variables dépendantes	168
<u>3.3.3. Résultats</u>	169
3.3.3.1. Comportement initial	169
3.3.3.2. Session d'apprentissage	174
3.3.3.3. Session de test : conséquences de l'apprentissage de 90°	176
3.3.3.3.1. Modification des patrons de coordination spontanés	176
3.3.3.3.2. Evolution de la performance sur les patrons requis (balayage)	181
3.3.3.3.3. Effet de l'ordre de passation des patrons lors du balayage	184

3.3.3.4. Amplitude de la tête lors de la tâche de poursuite de cible	185
<u>3.3.4. Discussion</u>	186
<b><u>CHAPITRE 4. DISCUSSION GENERALE</u></b>	<b><u>192</u></b>
<b>4.1. Evolution des caractéristiques du patron produit durant l'apprentissage</b>	<b>194</b>
<b>4.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ?</b>	<b>195</b>
<b>4.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation des attracteurs initiaux</b>	<b>197</b>
<b>4.4. Transfert d'apprentissage</b>	<b>200</b>
<b>4.5. Conclusion</b>	<b>202</b>
<b><u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u></b>	<b><u>204</u></b>

## Avant-propos

Ce travail doctoral s'appuie sur les articles suivants :

1. Bardy, B. G., Faugloire, E., & Stoffregen, T. A. The dynamics of learning new postural patterns. Article soumis.
2. Faugloire, E., & Stoffregen, T. A. (2003). The dynamics of learning new postures. In S. Rogers, J. Effken (Eds.), *Studies in perception and action VII* (pp. 109-112). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
3. Faugloire, E., Bardy, B. G., Merhi, O., & Stoffregen, T. A. (sous presse). Exploring coordination dynamics of the postural system with real-time visual feedback. *Neuroscience Letters*.
4. Bardy, B. G., Faugloire, E., & Fourcade, P. (sous presse). Changes in postural patterns with learning and expertise. In M. Latash & F. Lestienne (Eds.), *Progress in Motor Control IV*. Springer Verlag.
5. Faugloire, E., & Bardy, B. G. (2002). Expertise sportive et apprentissage d'une nouvelle coordination posturale. *Science & Motricité*. Article en révision.

Les premier et second articles concernent les expérimentations 1 et 2 rapportées dans le chapitre 2 de ce document. Le troisième article présente l'expérimentation 3 (chapitre 3). L'article 4 effectue un bilan des travaux récents réalisés dans le cadre des coordinations posturales, incluant leur modélisation ainsi que nos expérimentations sur l'apprentissage. Les résultats relatifs aux expérimentations 4 et 5 (chapitre 3) y sont abordés. Le sujet de l'expérimentation support du cinquième article sort quelque peu du cadre de ce manuscrit de thèse. Les données correspondantes ne seront pas présentées ici.

# INTRODUCTION

Qui ne s'est jamais extasié devant la précision et la fluidité du mouvement expert ? Qu'il s'agisse d'un sportif, d'un acrobate, ou d'un musicien, le spécialiste nous démontre le fascinant degré de maîtrise corporelle qui peut être atteint par le processus d'apprentissage. La prise de conscience de la difficulté est d'autant plus grande lorsque nous essayons de reproduire ce que nous venons d'observer ou que nous tentons de l'enseigner à quelqu'un. En tant qu'entraîneur de gymnastique rythmique depuis une dizaine d'année déjà, le problème de l'apprentissage de nouvelles coordinations m'est apparu très tôt de façon pratique. Vous avez devant vous une petite gymnaste, un ruban dans la main droite, qui ne parvient pas à faire des spirales (petits cercles très rapides à partir du mouvement du poignet) sans bouger la main libre de façon synchronisée à la main qui actionne le ruban. A partir de ce comportement rigide, vous devez lui apprendre non seulement à exécuter de façon simultanée un mouvement du bras gauche qui n'a rien à voir avec les spirales de la main droite, mais aussi à effectuer un pas de valse avec les pieds dans le même temps. Mon intérêt pour la compréhension du processus d'apprentissage a sans doute été guidé par ce type d'expérience.

Du mouvement hésitant et inadapté du débutant vers la maîtrise d'habiletés complexes à haute précision temporelle et spatiale, l'itinéraire est encore mal identifié, tant sur le plan théorique que pratique. L'expertise sous-tend de nombreuses questions relatives aux coordinations inter-segmentaires et à leur apprentissage. Comment un système aussi complexe que le corps humain parvient-il à s'organiser et à s'adapter de façon aussi stable et efficace ? Quels sont les mécanismes qui permettent l'acquisition d'une habileté qui semble, au départ, irréalisable pour l'apprenant ? L'apprentissage d'habiletés motrices constitue un domaine de recherche investigué par une variété d'approches, auxquelles sont associées différentes questions, théories et méthodes.

Ce travail doctoral se situe au croisement de deux champs de recherche relativement récents, qui définissent notre cadre théorique et notre outil d'analyse. Tout d'abord, il s'inscrit dans une approche dynamique de l'apprentissage moteur (e.g., Schöner, 1989 ; Zanone & Kelso, 1992a). La particularité majeure de cette approche est de mettre

l'accent sur les principes qui lient le processus d'apprentissage aux coordinations inhérentes à l'individu, c'est-à-dire les coordinations qui, naturellement, peuvent être produites de façon précise et stable. Différentes questions découlent de cette perspective : Quelles sont les conséquences de l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination sur les modes préexistants ? Qu'est-ce qui détermine la facilité avec laquelle un individu va apprendre une habileté donnée ? La deuxième pierre angulaire de notre étude correspond à une approche dynamique des coordinations posturales (voir Bardy, 2004, pour une revue). Le système postural se révèle être organisé en termes de phénomènes dynamiques, et caractérisé par des patrons hanche-cheville préférés. Les états spontanés ayant été explorés et analysés précédemment, la posture s'avère être un outil pertinent pour mieux comprendre les mécanismes et conséquences de l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination.

Notre premier chapitre présente le cadre théorique qui constitue la base de cette étude. La compréhension de l'approche dynamique de l'apprentissage nécessite au préalable de connaître les principes généraux de la théorie dynamique du contrôle moteur. Nous débutons donc par l'exposé de ces principes avant de nous consacrer à la question de l'apprentissage. L'approche dynamique de l'apprentissage moteur est considérée à la fois dans ses aspects théoriques (fondements et prédictions) et d'après les études expérimentales qui l'investiguent. Dans un troisième temps, nous décrivons les travaux relatifs aux coordinations posturales, notre outil d'analyse, et mettons en évidence les deux patrons hanche-cheville préexistants de façon inhérente chez les individus. La prise en compte de l'ensemble de ce contexte aboutit à la présentation des objectifs clés de notre travail et de leur formalisation expérimentale.

Les chapitres 2 et 3 décrivent les cinq expérimentations que nous avons menées. Dans le chapitre 2, deux expérimentations (1 et 2) permettent d'analyser l'interdépendance du processus d'apprentissage et de la dynamique de coordination spontanée du système postural. Les modes de coordinations sont dits spontanés car ils ne sont pas imposés par la tâche utilisée. Le but du participant est de synchroniser les mouvements de la tête aux oscillations antéropostérieures d'une cible. Il n'impose aucun mouvement précis des hanches et des chevilles, la tâche peut donc, en théorie, être réalisée à partir de n'importe quel patron de coordination. Dans le chapitre 3, nous nous intéressons aux conséquences

de l'apprentissage sous un paradigme différent. La dynamique de coordination est maintenant investiguée lorsque le patron hanche-cheville est requis, c'est-à-dire lorsque le participant a pour but de produire un mode de coordination particulier. L'expérimentation 3 analyse en premier lieu la performance d'une large gamme de modes posturaux sans qu'il y ait d'apprentissage, puis l'expérimentation 4 investit la question du lien entre coordinations requises et coordination apprise. L'objectif principal de l'expérimentation 5 est de mettre en parallèle les conséquences de l'apprentissage sur la dynamique de coordination spontanée vs. requise.

La discussion générale menée dans le chapitre 4 nous permet de synthétiser nos résultats expérimentaux, et de les confronter aux prédictions théoriques de l'approche dynamique, ainsi qu'aux travaux ayant étudié des questions similaires aux nôtres à partir d'autres systèmes effecteurs. Ces réflexions offrent un point de vue nouveau sur la dynamique de l'apprentissage (notamment sur le rôle de la nature de la tâche) et ouvrent certains axes prospectifs.

# CHAPITRE 1

---

---

## Cadre Théorique

## 1.1. Approche Dynamique du Contrôle Moteur

L'élaboration d'une théorie de l'apprentissage moteur présuppose une théorie du contrôle moteur. Dans cette thèse, l'acquisition d'une nouvelle coordination posturale est envisagée sous l'angle de l'approche dynamique de l'apprentissage. Cette perspective découle directement de l'approche dynamique du contrôle moteur dont nous allons décrire les principaux aspects ici.

### 1.1.1. Qu'est-ce que la coordination ?

De façon générale, la coordination peut être définie comme étant l'agencement des parties d'un tout pour une fin déterminée, dans une mise en ordre mutuelle. Appliquée au domaine de la motricité, cette définition renvoie au problème de l'organisation de la multitude d'éléments composant le système biologique. De quelle façon sont contrôlés les mouvements d'un système d'une telle complexité ? Cette question est à la base des théories du contrôle moteur. Dans ses travaux, Bernstein (1967) explicite ce problème en définissant la coordination comme étant la maîtrise des degrés de liberté redondants de l'organisme pour en faire un système contrôlable (p. 127). Dans cette définition, Bernstein fait particulièrement référence aux degrés de liberté présents au niveau articulaire et musculaire, mais en principe, le problème peut s'envisager à une variété de niveaux d'analyse, c'est à dire à des niveaux plus ou moins macroscopiques ou microscopiques (e.g., Newell, 1996 ; Newell & McDonald, 1994 ; Newell & Vaillancourt, 2001). Plus on considère des micro-niveaux d'analyse, plus le nombre de degrés de liberté impliqués dans le mouvement augmente. Il passe ainsi de l'ordre de 110 articulations, à 792 muscles, à une centaine de milliers de milliards de cellules ! En conséquence, le mouvement biologique coordonné est le produit de la mise en œuvre de millions de degrés de liberté à travers plusieurs niveaux d'analyse biologique articulaire, musculaire, neuronal, cellulaire... (Newell, 1996 ; Turvey, 1990). Même à un niveau relativement macroscopique, la redondance des degrés de liberté autorise plusieurs configurations articulaires possibles pour répondre aux demandes de la tâche (Newell & McDonald, 1994). Il existe donc un nombre imposant de coordinations potentielles pour un même but d'action, ce qui permet la flexibilité des comportements. Nous verrons que malgré l'importance de cette redondance, les individus présentent des tendances préférées relativement exclusives, et que toutes les coordinations ne sont pas réalisables avec la même facilité.



### 1.1.2. Opposition de la théorie dynamique au regard des approches classiques

A partir de ces éléments de définition, comment peut-on expliquer l'ordre et la forme présentés par les mouvements de notre organisme ? Autrement dit, comment les nombreux degrés de liberté du système moteur sont-ils coordonnés et maîtrisés? Au cours des années, plusieurs propositions se sont présentées pour expliquer le contrôle et la coordination des mouvements : chaînes linéaires réflexes et connexions stimulus-réponse, programme central, feedback (mécanismes de correction d'erreurs), puis structures coordinatives ou système auto-organisé. L'approche dynamique développée depuis une vingtaine d'années dans le domaine du contrôle moteur s'oppose aux conceptions qui étaient admises jusqu'alors (e.g., Beek, Peper, & Stegeman, 1995 ; Semjen, 1994, pour des revues de questions sur cette opposition). Dans l'approche "classique", souvent qualifiée de cognitive, les différents éléments du système effecteur exécutent les instructions en provenance du système nerveux central. Le contrôle des mouvements se fait donc de façon prescriptive : les ordres moteurs sont émis par le système nerveux central en direction de l'espace effecteur. Selon l'approche dynamique, la coordination est considérée comme un problème d'auto-organisation, où le mouvement produit n'est pas la conséquence directe d'une instruction externe. Les composants du système coopèrent et agissent en interaction afin de réaliser un but commun. Turvey, Shaw et Mace (1978) formalisent cette opposition en parlant de hiérarchie du contrôle moteur pour la première approche (i.e., unidirectionnalité des commandes, centralisation du contrôle, fonctions remplies par des systèmes spécifiques), et d'hétéarchie dans la deuxième (i.e., réciprocity dans le flux d'information, décentralisation et distribution du contrôle, coopération des systèmes).

L'approche dynamique du contrôle moteur, développée relativement récemment, s'oppose à la transposition littérale des concepts de la théorie de l'information aux processus du système nerveux biologique (Wiener, 1948 ; voir Sternad, 2000 ; Swinnen & Carson, 2002, pour des revues historiques). Pour les théories dynamiques, concevoir la motricité comme programmée centralement et spécifiquement (c'est à dire avec des instructions spécifiques pour chaque muscle) pose deux problèmes majeurs pour une théorie du contrôle du mouvement (Turvey et al., 1978). Le premier problème est relatif aux degrés de liberté, trop nombreux au niveau de l'appareil musculo-squelettique animal pour que ceux-ci puissent être contrôlés individuellement. En effet, un acte moteur

complexe nécessite le contrôle d'un tel nombre de degrés de liberté qu'une programmation centrale exhaustive semble difficilement envisageable. Le deuxième problème concerne la relation entre l'instruction et l'acte moteur qu'elle engendre. Cette relation n'est pas isomorphe : un même programme peut avoir des conséquences différentes selon le contexte dans lequel il se déroule. Cette idée fait référence à la présence de non univocité entre la commande motrice et le mouvement effectué. Insufflée par le courant d'études sur les dynamiques non-linéaires – issu de domaines tels que la météorologie (Lorenz, 1963) et la thermodynamique (Nicolis & Prigogine, 1977) –, l'approche dynamique du contrôle moteur réfute le principe de prescription du mouvement par le système nerveux central. Des arguments remarquables sont mis en évidence, comme le fait que les lois régissant un mouvement mono-segmentaire ne sont plus valables lorsque plusieurs segments sont impliqués (Kelso, Southard, & Goodman, 1979), ou que la variation continue d'un paramètre de la tâche entraîne une modification brusque et involontaire du comportement (Kelso, 1984).

Plutôt que de considérer la coordination comme planifiée et organisée au niveau du système nerveux central, l'approche dynamique l'envisage comme le résultat d'une auto-organisation au niveau du système effecteur. Pour les théoriciens dynamiques, beaucoup d'approches traditionnelles ignorent ou sous-estiment la contribution des aspects dynamiques et cinématiques du mouvement à son contrôle et sa coordination (Turvey, 1990 ; Turvey, Fitch, & Tuller, 1982). Le système nerveux central n'est pas le niveau propriétaire de l'explication du mouvement (Schmidt & Fitzpatrick, 1996). L'apparition de patrons de coordination et la commutation ou le changement de patron surgit suite à la coopération dynamique du système sans influence d'ordre extérieur spécifique et sans prescription par le système nerveux central. Ainsi, c'est la libre interaction entre les forces et les influences mutuelles entre les composants vers des états d'équilibre ou états stables qui sont essentiellement responsables de l'ordre du processus biologique (Kugler, Kelso, & Turvey, 1980).

### 1.1.3. Système de contraintes et Auto-organisation

Selon le concept fondamental d'*auto-organisation* sur lequel se base la théorie dynamique du contrôle moteur (Haken, 1977, 1983), le contrôle n'est pas centralisé par une

instance supérieure, il est distribué entre les différents éléments constitutifs du système.<sup>1</sup> L'influence réciproque entre ces éléments amène l'émergence d'une forme particulière de mouvement, d'un patron de coordination spécifique.

Dans ce cadre, les conditions dans lesquelles les mouvements sont exprimés sont essentielles pour expliquer le mode de coordination adopté. Ces conditions peuvent être vues comme des *contraintes* qui limitent les mouvements possibles dans la situation considérée. Ces contraintes de nature diverse (environnementale, biomécanique, métabolique, intentionnelle...), jouent un rôle déterminant sur la réduction des degrés de liberté du système moteur. Newell (1986), distingue trois catégories générales de contraintes à l'action : l'organisme, l'environnement et la tâche (Figure 1.1.). Ces trois types de contraintes interagissent pour fournir des conditions limites aux modes de coordination émergents qui doivent les satisfaire. Ce n'est pas que les actions sont causées par les contraintes, c'est plutôt que certaines actions sont exclues par elles : elles canalisent la dynamique du mouvement en restreignant l'étendue des coordinations possibles (Kugler et al., 1980). Il est important de souligner que les intentions du sujet (relatives au but de la tâche), sont ici considérées au même titre que les autres contraintes, et non pas comme des prescriptions du système nerveux central vers les effecteurs.

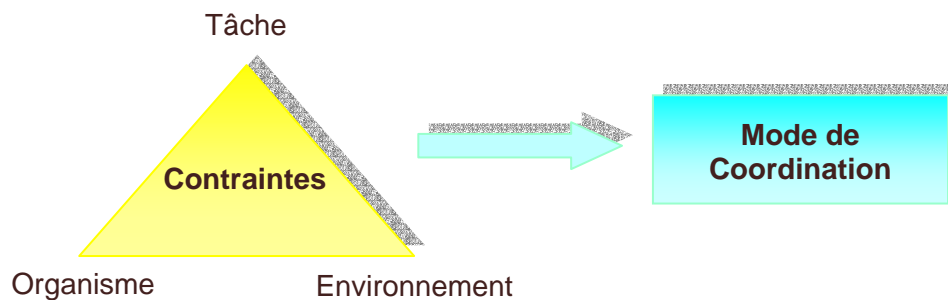


Figure 1.1. Diagramme schématisant les catégories de contraintes qui guident l'émergence du patron de coordination (d'après Newell, 1986).

<sup>1</sup> Le terme "système" est ici, pris au sens large : il ne concerne pas seulement l'organisme, mais aussi son environnement.

Une caractéristique importante de ce système auto-organisé est qu'il présente une *dynamique non-linéaire*. Autrement dit, les effets observés ne sont pas proportionnels à leur cause. Ainsi, d'importantes variations au niveau des conditions constituant la situation peuvent être sans effet sur le mode de coordination adopté. Inversement, une modification minimale d'un paramètre donné appartenant à l'une des sources de contraintes, peut mener à des changements brusques et importants au niveau du mode de coordination effectué. Cette transformation qualitative de l'état du système est alors appelée *bifurcation* ou *transition de phase*. De plus amples explications sur l'apparition de ce phénomène ainsi que sa modélisation mathématique seront présentées dans les paragraphes 1.1.7 et 1.1.9.

#### 1.1.4. Systèmes dissipatifs et Attracteurs comportementaux

La dynamique d'un *système dissipatif* est gouvernée par la diminution (dissipation) continue de l'énergie au cours du temps. Dans de tels systèmes, le volume des trajectoires représentant l'évolution de l'état du système dans l'espace des phases<sup>2</sup>, diminue jusqu'à converger vers un état d'équilibre unique, quel que soient les conditions initiales. Le système atteint alors un minimum énergétique qui lui assure la stabilité de son état face aux perturbations. Ces états vers lesquels le système est systématiquement attiré à partir de différents états initiaux sont appelés états *attracteurs*.

La représentation de ces attracteurs dans l'espace des phases peut prendre plusieurs formes (Figure 1.2.), par exemple, l'oscillation d'un pendule amorti sera attiré vers un point fixe (état stationnaire correspondant à l'absence d'évolution), et celle d'un pendule entrepris tendra vers un cycle limite périodique (oscillations sinusoïdales). L'attracteur peut également être quasi-périodique ; sa forme correspond alors à un tore dans l'espace des phases. Certains systèmes présentent des attracteurs aux formes géométriques plus complexes appelés chaotiques ou étranges. Ces attracteurs ont été découverts relativement récemment par Lorenz (1963) dans ses travaux sur la météorologie, puis analysés et expliqués par Ruelle et Takens (1971).

---

<sup>2</sup> L'évolution de l'état du système peut être représentée de façon intelligible dans ce qu'on appelle l'espace des phases. Les axes de coordonnées de cet espace correspondent aux variables dynamiques indépendantes du système. Ainsi, pour un mouvement pendulaire, l'espace des phases est un plan dont les axes de coordonnées sont la position et la vitesse.

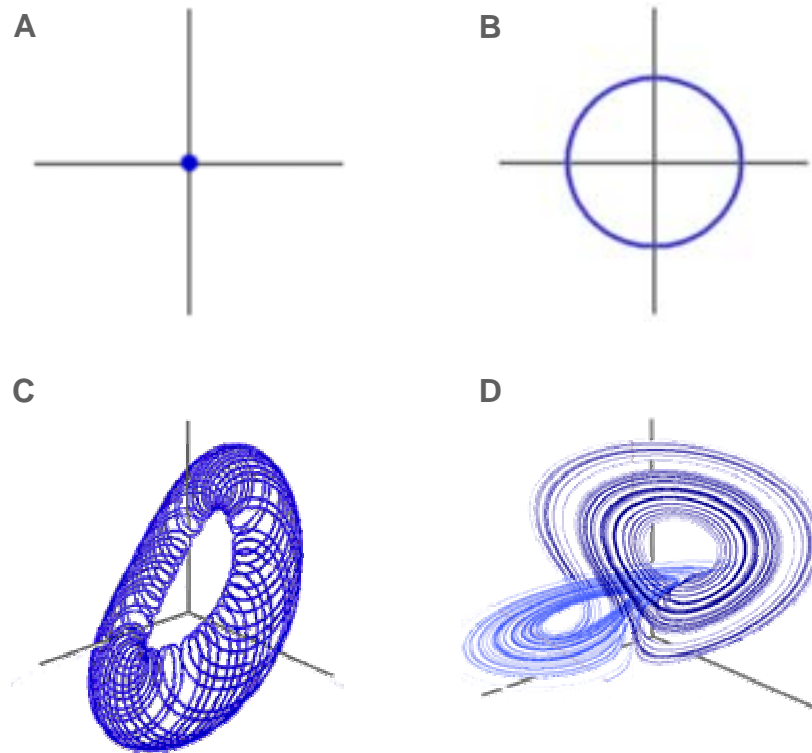


Figure 1.2. Représentation de quatre types d'attracteurs dans l'espace des phases : (A) état stationnaire (point fixe) ; (B) attracteur périodique (cycle limite) ; (C) attracteur quasi-périodique (tore) ; et (D) attracteur chaotique (ou étrange).

Kugler et al. (1980), ont avancé l'idée que le système moteur s'apparente à un système dissipatif. Il présente en effet des modes de coordination attracteurs - aussi qualifiés de spontanés, naturels ou préférentiels - qui sont systématiquement observés dans diverses tâches motrices. En accord avec les principes physiques généraux présentés ci-dessus, un mode de coordination attracteur peut être défini comme étant une organisation spatio-temporelle qualitative particulière vers laquelle les trajectoires dans l'espace des phases évoluent, indépendamment de leurs conditions initiales (Newell, 1996). Le bassin d'attraction d'un attracteur donné se réfère à la région de l'espace des phases pour laquelle presque toutes les conditions initiales convergent vers l'attracteur (Kelso, Ding, & Schöner, 1992). Ainsi, les états initiaux se situant dans le bassin d'attraction évolueront de

façon à confluer vers l'état attracteur. Une propriété essentielle de la dynamique biologique est que plusieurs attracteurs avec des bassins d'attraction différents peuvent coexister (Kelso et al., 1992). La dynamique du système est alors multi-stable. Après avoir présenté la variable qui permet de définir les différentes coordinations inter-segmentaires, nous verrons comment formaliser la dynamique de coordination et ses attracteurs.

### 1.1.5. Variable collective

Afin de caractériser les différents modes de coordination pour un type de mouvement donné, l'approche dynamique utilise une variable qui traduit le comportement collectif des éléments du système. Cette variable, appelée *paramètre d'ordre* ou *variable collective*, définit la propriété qualitative du patron de coordination. Elle rend compte du comportement du système dans une mesure unique et à un niveau macroscopique. Dans le domaine de la motricité, le système est souvent apparenté à un ensemble d'oscillateurs (de par le mouvement de flexion-extension des articulations) fonctionnant simultanément et s'influençant réciproquement. Le mouvement sinusoïdal de l'oscillateur correspond à un cycle limite lorsqu'il est représenté dans l'espace des phases (position vs. vitesse). La position instantanée de l'oscillateur peut être alors être décrite en terme d'angle de phase (cf. Figure 1.3.). On peut donc rendre compte de la coordination entre deux oscillateurs grâce au décalage de phase ou relation de phase  $\phi_{rel}$ , qui correspond à la différence entre les phases des deux oscillateurs à moment donné :  $\phi_{rel} = \phi_1 - \phi_2$ . La Figure 1.4. montre différents exemples de phases relatives représentées dans l'espace des phases et dans le domaine temporel.

La phase relative entre les mouvements de flexion-extension de deux segments s'est révélée être une variable collective pertinente de la coordination inter-segmentaire (e.g., Kelso, 1984 ; Schöner & Kelso, 1988 ; Schöner, Zanone, & Kelso, 1992). Elle rapporte l'organisation spatio-temporelle entre les segments en mouvement, et exprime le brusque changement de l'état de coordination du système lors des transitions de phase (e.g., Kelso, 1994b). La phase relative permet de caractériser la coordination de systèmes moteurs très différents, ce qui favorise l'étude théorique générale de la formation des patrons (Schöner & Kelso, 1988).

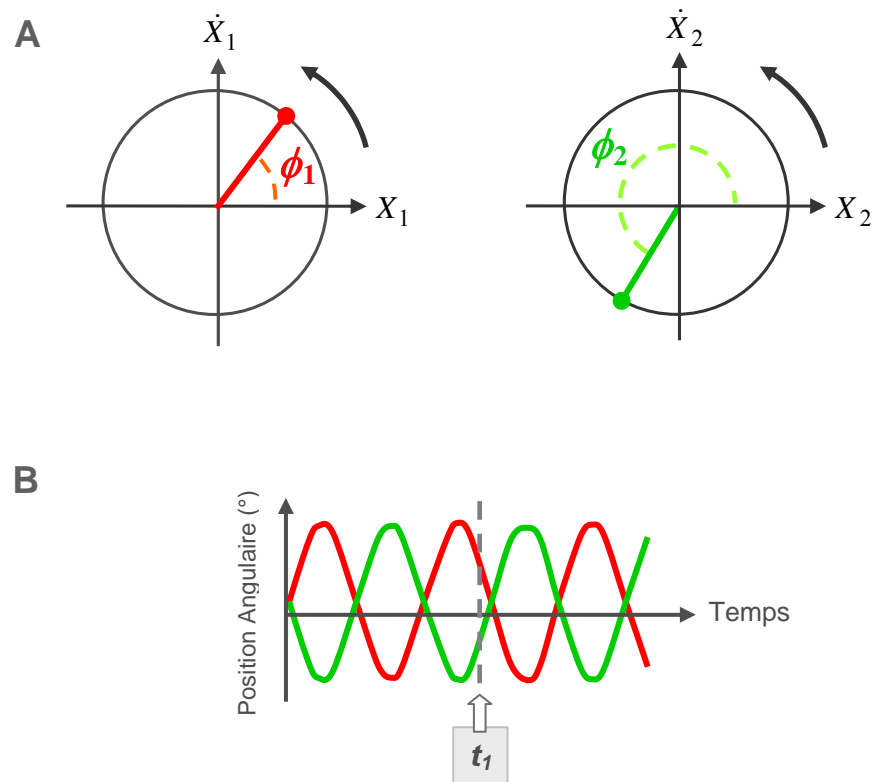


Figure 1.3. A : Phases  $\phi_1$  et  $\phi_2$  de deux oscillateurs harmoniques, dans l'espace des phases à un moment  $t_1$  (e.g. Kelso, 1995). La vitesse ( $\dot{X}$ ) est tracée en fonction de la position ( $X$ ). La flèche indique le sens de déplacement des oscillateurs sur le cycle limite (sens trigonométrique). B : évolution de la position de ces deux oscillateurs au cours du temps. La ligne en pointillés indique le moment  $t_1$  auquel sont tracés les angles de phase des deux oscillateurs en A. Dans cet exemple, la phase relative  $\phi_{rel}$  (i.e.,  $\phi_1 - \phi_2$ ) est proche de  $180^\circ$  (coordination en anti-phase).

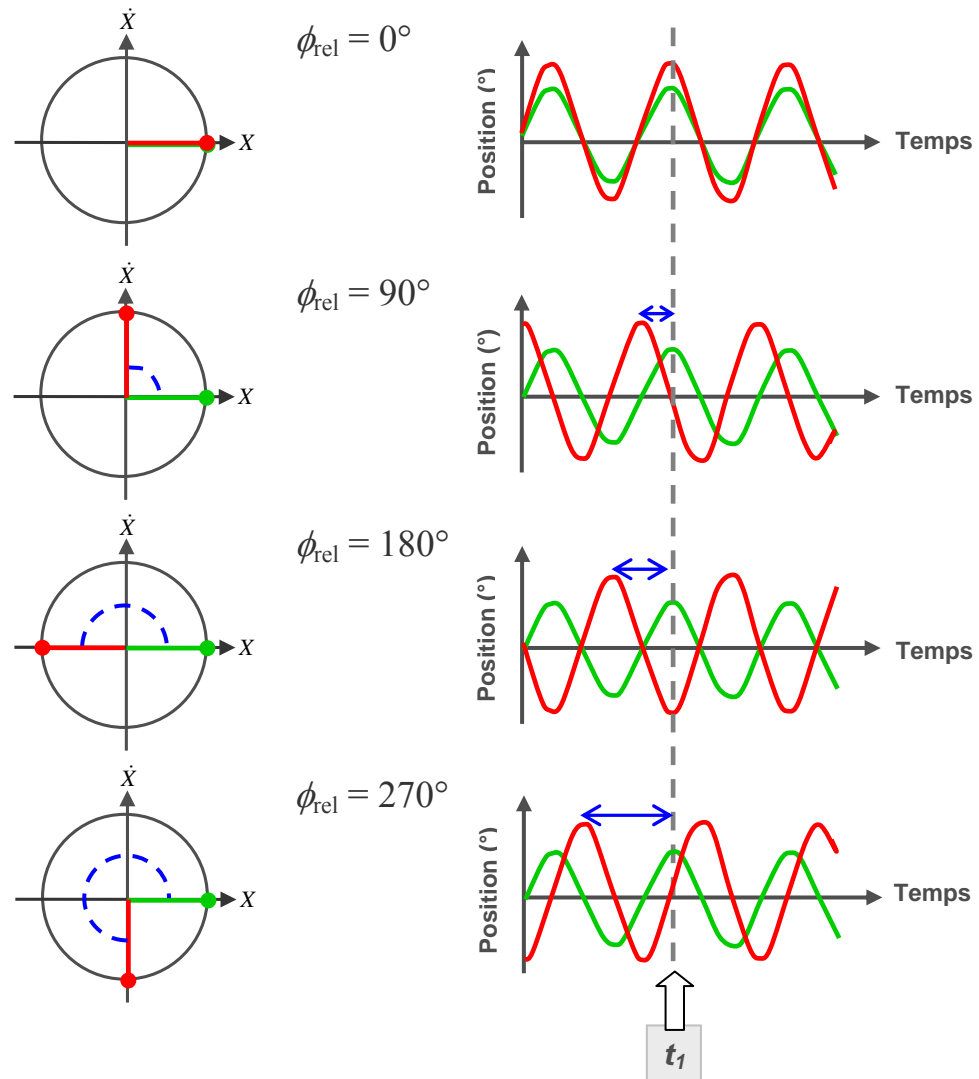


Figure 1.4. Quatre exemples de phase relative entre deux oscillateurs harmoniques. De haut en bas :  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$ . A gauche : dans l'espace des phases. A droite : dans le domaine temporel. Les angles de phases dans la partie gauche sont tracés au moment  $t_1$  indiqué par la ligne en pointillés dans le domaine temporel (partie droite).

### 1.1.6. Le concept de dynamique intrinsèque

Nous avons vu que le système de coordination inter-segmentaire se comportait comme un système dissipatif attiré vers certains états stables parmi l'ensemble des états possibles. Ces modes de coordination préférés peuvent être appelés *patrons intrinsèques* car ils apparaissent spontanément lors d'exigences de tâche diverses, et sans qu'ils soient imposés au système par l'environnement (e.g., Schöner & Kelso, 1988). De la même façon, la dynamique de la variable collective peut être dénommée *dynamique intrinsèque* : il s'agit



des *tendances de coordination* préférées et stables qui existent à un moment donné, qu'elles soient liées à des contraintes biologiques innées ou aux expériences antérieures (Kelso, 1994b ; Zanone & Kelso, 1992a, 1994). Bien que sa connotation à des propriétés innées, permanentes et rigides ait été soulevée (Zanone & Kelso, 1997, note de bas de page 1), la définition du terme de dynamique intrinsèque est claire et nous l'utiliserons à ce titre dans ce travail.

### 1.1.7. Les paramètres agissant sur la dynamique intrinsèque

Dans le paragraphe 1.1.3., nous avons abordé le fait qu'un ensemble de paramètres (liés aux contraintes de l'organisme, de la tâche ou de l'environnement) influençait le mode de coordination adopté par le système. Ces paramètres peuvent être de nature *spécifique* ou *non-spécifique* par rapport aux modifications de la variable collective qu'ils supposent. La variation de certains paramètres peut mener à des changements brusques dans le comportement adopté. Au niveau théorique, cette substitution d'un état de coordination à un autre peut être expliquée par une transition de phase, c'est-à-dire par la perte de stabilité d'un attracteur de la dynamique de coordination. Les paramètres dont la variation provoque ce changement qualitatif non-linéaire sont appelés *paramètres de contrôle*. Ces paramètres sont dits *non-spécifiques* car ils modifient la dynamique intrinsèque lorsqu'ils atteignent un seuil critique, alors qu'ils ne spécifient pas de patron de phase relative particulier (e.g., Zanone & Kelso, 1994). Par exemple, pour une tâche de coordination entre les deux poignets (tâche bi-manuelle), l'augmentation de la fréquence d'exécution, non-spécifique par rapport à la phase relative, amène, pour une valeur seuil donnée, une bifurcation du mode de coordination en anti-phase vers le mode en phase (Kelso, 1984).

Au contraire, les paramètres *spécifiques* indiquent le mode de coordination qui doit être adopté par le système. Ces paramètres correspondent à des *informations comportementales* qui peuvent être de nature environnementale ou intentionnelle (e.g., Kelso, 1994b ; Schöner & Kelso, 1988 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1994). L'influence de ces informations peut être vue comme une force qui attire la variable collective à une valeur spécifique (e.g., Zanone & Kelso, 1994). L'instruction de produire une phase relative particulière pour un système effecteur donné est un exemple simple d'information comportementale.

### 1.1.8. Travaux Expérimentaux

De quelle façon ces principes théoriques de la théorie dynamique coïncident-ils avec l'observation expérimentale ? Quels sont les états attracteurs du système inter-segmentaire ? Nous présentons ici les premiers travaux ayant mis en évidence les signatures des systèmes dynamiques non-linéaires et les modes de coordination attracteurs dans des tâches bi-manuelles.

Les travaux de Kelso (1981, 1984) mettent en évidence que les mouvements périodiques de deux membres supérieurs homologues - les deux index (Kelso, 1981) ou les deux poignets (Kelso, 1984) - présentent seulement deux modes de coordination stables à basse fréquence : en phase (activation simultanée des muscles homologues,  $\phi_{rel} = 0^\circ$ ) et en anti-phase (activation alternée,  $\phi_{rel} = 180^\circ$ ). De plus, lorsque les participants ont pour instruction de produire un mouvement en anti-phase, l'augmentation de la fréquence d'exécution (paramètre de contrôle non-spécifique), produit un changement involontaire du patron en anti-phase au patron en phase à une valeur critique du paramètre (Kelso, 1981, 1984 ; Kelso, Scholz, & Schöner, 1986 ; Scholz, Kelso, & Schöner, 1987). En revanche, le patron en phase peut être produit de façon stable sur une gamme de fréquences beaucoup plus importantes, et aucun changement n'apparaît lorsque l'essai débute avec ce mode de coordination. Des travaux de modélisation (Haken, Kelso, & Bunz, 1985 ; Schöner, Haken, & Kelso, 1986) et des expérimentations (Kelso, 1984 ; Kelso et al., 1986 ; Scholz & Kelso, 1989 ; Scholz et al., 1987) ont montré que ce changement brusque de patron de coordination pouvait s'expliquer par la bifurcation d'une dynamique bistable vers une dynamique monostable de la phase relative entre les éléments en mouvement. Ceci se produit sans qu'aucune exigence de la tâche n'indique ce changement de patron, puisque la seule variation de contrainte est l'augmentation progressive de la fréquence d'oscillation. Les mesures de stabilité menées dans les différentes expérimentations précitées montrent que le mode de coordination en phase est plus stable que l'anti-phase. Ces mesures peuvent correspondre à l'importance des fluctuations de la variable collective (écart-type de la phase relative), ou au temps mis par le système pour retrouver son état initial après que la bifurcation ait eu lieu (temps de relaxation).

Dans une autre série d'expérimentations, la dynamique de coordination a été "balayée" afin d'explorer les caractéristiques des patrons produits sur une large gamme de

phases relatives requises (Tuller & Kelso, 1989 ; Yamanishi, Kawato, & Suzuki, 1980). Pour cela, une information comportementale spécifiant différents patrons de coordination exigés est fournie aux participants. Les expérimentateurs requièrent la production successive de plusieurs patrons de phase relative qui diffèrent d'un intervalle relativement faible afin d'explorer l'ensemble de la dynamique de coordination. Pour ces deux études, les participants doivent coordonner la frappe de leurs index selon 10 phases relatives différentes, comprises entre  $0^\circ$  et  $324^\circ$  (le pas est de  $36^\circ$ ). Ces différents patrons de coordination sont présentés de façon randomisée. D'autre part, les phases relatives à produire sont spécifiées par les signaux de deux métronomes visuels (fréquence de 1 Hz) : les participants doivent faire correspondre la frappe de l'index droit au moment de l'apparition du signal situé à leur droite, et réciproquement pour l'index gauche.

Dans l'expérimentation de Yamanishi et al. (1980), dans un premier temps, les 10 modes de coordination sont pratiqués en présence de ces signaux visuels. Si une différence de  $\pm 13^\circ$  est constatée par rapport à la phase relative exigée, une information en retour donnant le sens de l'erreur ("plus court" ou "plus long") est donnée au participant. Après cet entraînement, des essais de test sont réalisés, durant lesquels le guidage visuel est fourni pendant les 10 premiers cycles, puis retiré lors des 20 cycles suivants. Les sujets ont pour consigne de continuer à produire la phase relative requise. L'analyse des données est effectuée sur les 20 cycles produits sans signal visuel. Dans les expérimentations de Tuller et Kelso (1989), les signaux sont disponibles tout le temps et il n'y a pas de période de pratique. Ces expérimentations mènent à deux conclusions principales communes : (i) l'erreur du patron produit par rapport au patron exigé et sa variabilité sont plus faibles lorsque la phase relative requise est de  $0^\circ$  ou de  $180^\circ$  ; (ii) les patrons produits dévient vers ces deux modes lorsque d'autres valeurs de phase relative sont demandées. Ainsi, non seulement la performance est meilleure pour les patrons en phase et en anti-phase, mais ces états stables attirent le système de coordination lorsque des valeurs de phase relative voisines sont requises.

En résumé, les résultats expérimentaux princeps sur les coordinations bi-manuelles mènent à quatre conclusions fondamentales :

1. La phase relative s'est révélée être une variable collective pertinente pour l'étude de la coordination inter-segmentaire ;

2. La phase ( $\phi_{\text{rel}} = 0^\circ$ ) et l'anti-phase ( $\phi_{\text{rel}} = 180^\circ$ ) sont les deux patrons de coordination intrinsèques du système bi-manuel. De plus, le patron en phase présente une stabilité supérieure à celle du patron en anti-phase.
3. La variation d'un paramètre de contrôle mène à une transition de phase de la variable collective, avec une perte de stabilité du patron en anti-phase en faveur du mode en phase.
4. La phase et l'anti-phase constituent des modes de coordination attracteurs vers lesquels se dirigent les modes intermédiaires.

### 1.1.9. Modélisation de la dynamique de coordination

La dynamique de la variable collective du système de coordination mise au jour par Kelso (1981, 1984) a été modélisée mathématiquement par Haken et al. (1985). Ce modèle, devenu classique dans la littérature sur la coordination inter-segmentaire, rend compte de la dynamique de coordination lorsque les conditions limites contraignant le système ne spécifient pas de patron particulier. Dans la partie 1.2.1.2., nous verrons la modélisation élargie au cas où une information comportementale est présente. La dynamique de la phase relative est représentée par une fonction potentielle  $V(\phi)$  définie par

$$V(\phi) = -a \cos(\phi) - b \cos(2\phi) \quad (1)$$

où  $\phi$  correspond à la phase relative entre les segments oscillants, et le rapport  $b/a$  renvoie à la valeur d'un paramètre de contrôle agissant sur la dynamique de coordination. En tant que système dissipatif, le système de coordination est attiré par les valeurs minimums du potentiel. Les puits définis par la fonction potentielle correspondent aux bassins d'attraction de la dynamique intrinsèque. La stabilité et l'attractivité des patrons intrinsèques sont indiquées par la profondeur et la pente de ces puits, respectivement. Plus le bassin d'attraction est profond, plus l'état de coordination correspondant sera stable, et plus la pente du bassin sera raide, plus les états de coordination voisins seront attirés vers cet état. La ligne supérieure de la Figure 1.4. montre l'évolution de l'état du système (représenté par une bille dans la fonction potentielle) avec la variation d'un paramètre de contrôle représenté par le rapport  $b/a$ . Nous pouvons voir que cette visualisation de la *disposition des attracteurs* (ou *diagramme de phase*) permet de modéliser les observations caractéristiques d'un système auto-organisé constatées dans les coordinations bi-manuelles (Kelso, 1981, 1984), à savoir, la multi-stabilité (coexistence de deux états stables pour la même valeur du paramètre de contrôle), la transition d'un état à un autre, et l'hystérésis (si

le rapport  $b/a$  varie de 0 vers 1, aucune transition n'aura lieu, et le mode en phase sera conservé pour toutes les valeurs du paramètre de contrôle). Pour un rapport  $b/a$  supérieur à  $1/4$ , deux attracteurs existent pour des phases relatives de  $0^\circ$  (i.e., 0 rad) et de  $180^\circ$  (i.e.,  $\pi$  rad). Lorsque ce rapport devient inférieur à la valeur critique de  $1/4$ , l'attracteur en anti-phase disparaît et seule la phase relative de  $0^\circ$  reste stable. Si la variation du paramètre de contrôle est inversée, le système reste au niveau de l'attracteur en phase. Ce phénomène d'hystérésis est lié à la conservation de stabilité de l'attracteur de  $0^\circ$ .

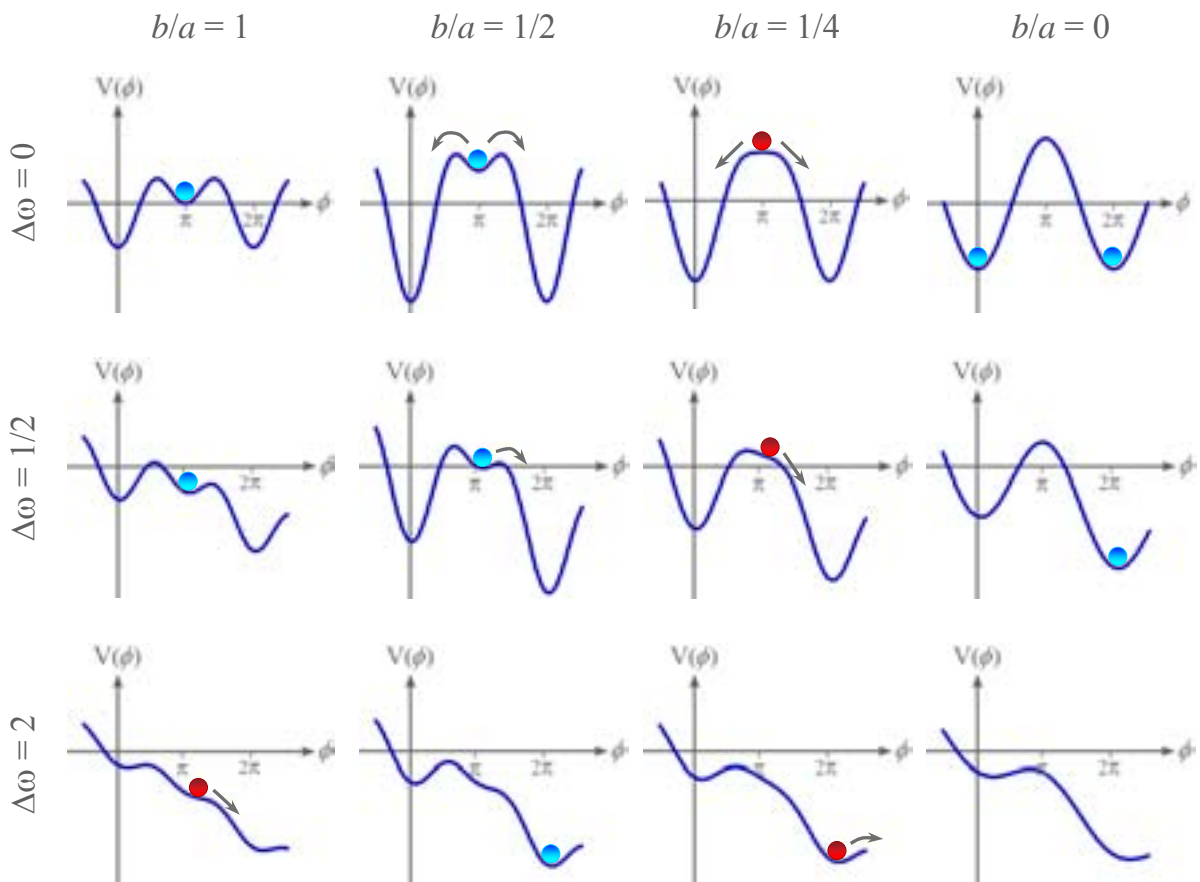


Figure 1.5. Evolution de la fonction potentielle  $V(\phi)$  en fonction des paramètres  $b/a$  (paramètre de contrôle) et  $\Delta\omega$  (différence de fréquence propre entre les segments). La particule représente l'état de coordination adopté par le système. Celui-ci est attiré par les valeurs minimales du potentiel. Dans l'exemple pris ici, l'état du système est initialement en anti-phase ( $\phi = \pi$ ), puis bifurque vers le patron en phase ( $\phi = 0 \pm 2\pi$ ) avec la variation du rapport  $b/a$ . Les états stables du système sont représentés en bleu, et les états instables, précédant la transition, en rouge. (D'après Haken et al., 1985 ; Kelso, DelColle, & Schöner, 1990).

Plusieurs évolutions du modèle ont été apportées par la suite. En 1986, Schöner et al. ajoutent un terme stochastique au modèle HKB afin de traduire l'influence du bruit en provenance des sous-systèmes plus microscopiques, sur la variable collective. Cette extension ne sera pas exposée ici. En 1990, Kelso, DelColle et Schöner adaptent le modèle au cas d'un système asymétrique. Développée à l'origine pour une situation d'action-perception<sup>3</sup>, cette formalisation peut aussi être utilisée pour modéliser la coordination de membres non homologues (Jeka & Kelso, 1995 ; Kelso, 1994a, 1994b ; Kelso & Jeka, 1992 ; Kelso & Zanone, 2002 ; Riley, Santana, & Turvey, 2001 ; voir également Fuch, Jirsa, Haken, & Kelso, 1996, pour de plus amples détails sur la formalisation). Un terme supplémentaire introduit dans le modèle HKB permet de définir la différence entre les fréquences non-couplées des segments coordonnés. En effet, lorsqu'un segment oscille seul (i.e., de façon non coordonnée, non couplée au mouvement d'un autre segment), il présente une fréquence préférée que l'on peut qualifier de *fréquence propre*. Des segments différents, par exemple, un bras et une jambe, possèdent des propriétés différentes, notamment au niveau de leur masse et de leur longueur. Ces propriétés les amènent à avoir des fréquences propres différentes.<sup>4</sup> La prise en compte de cette différence de fréquence propre  $\Delta\omega$  entre les segments coordonnés dans la formalisation de la fonction potentielle donne :

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

Lorsque  $\Delta\omega = 0$ , les segments sont identiques (e.g., coordination bi-manuelle) et la dynamique de coordination est symétrique (résultat identique à l'équation (1) : ligne supérieure de la Figure 1.4.). Pour des valeurs non nulles de  $\Delta\omega$ , la symétrie de la dynamique de coordination est brisée. Les lignes intermédiaire et inférieure de la Figure 1.4. permettent de visualiser trois caractéristiques différenciant la coordination de membres non-homologues par rapport au cas symétrique. Premièrement, les minima de la fonction potentielle s'éloignent des valeurs pures de phase et d'anti-phase ( $\phi = 0 \pm 2\pi$  rad ;  $\phi = \pi$

<sup>3</sup> La tâche initiale consistait à syncoper le mouvement par rapport au stimulus auditif, c'est-à-dire fléchir le doigt entre deux signaux consécutifs.

<sup>4</sup> Dans ses travaux pionniers étudiant la coordination du mouvement des nageoires chez les poissons, von Holst (1937/1973) identifie deux types de processus qui peuvent être contradictoires pour la coordination. Le premier, appelé *tendance de maintenance*, correspond à l'attraction du segment vers sa fréquence préférée non couplée. Le deuxième, appelé *effet aimant*, correspond au processus par lequel, lors de la coordination inter-segmentaire, chaque segment influence les autres en essayant de les attirer vers sa fréquence propre. Ces processus peuvent être illustrés, par exemple, par l'expérimentation de Kelso et Jeka (1992), qui observent une fréquence d'oscillation maximale de 3.6 Hz pour le bras et 2.5 Hz pour la jambe lorsque ces membres oscillent isolément, alors que lorsqu'ils bougent simultanément, la fréquence de mouvement de la jambe n'excède jamais 1.8 Hz.

rad). Deuxièmement, contrairement au cas symétrique pour lequel les directions de bifurcation sont équiprobables, les transitions de phase entre les états se font dans une direction prédominante. Troisièmement, pour des valeurs importantes de  $\Delta\omega$ , il n'existe plus aucun état stable dans la disposition des attracteurs. On s'attend alors à une errance de la phase relative parmi plusieurs patrons de coordination. Ces prédictions théoriques ont été vérifiées lors d'observations expérimentales (Jeka & Kelso, 1995 ; Kelso & Jeka, 1992). Cette modélisation est importante car elle concerne un nombre de situations beaucoup plus important que celui couvert par la coordination entre deux segments homologues.

#### 1.1.10. Influences sur les tendances de coordination préférées

Dans de récentes études, des conditions inattendues se sont révélées influencer la dynamique de coordination de façon fondamentale. Nous clôturons ce chapitre par un aperçu rapide sur certains de ces travaux.

Carson et ses collègues (Byblow, Carson, & Goodman, 1994 ; Carson, 1996 ; Carson, Riek, Smethurst, Parraga, & Byblow, 2000 ; voir Carson, 2004, pour une revue) ont mis en évidence l'importance du contexte mécanique sur la coordination. Par exemple, Carson et al. (2000) utilisent une tâche de prono-supination des deux avant-bras pour laquelle l'axe de rotation du mouvement de chaque bras est soit adjacent au cubitus, soit au radius. La fréquence d'exécution est augmentée durant l'essai afin d'observer les transitions qui apparaissent spontanément à partir de la réalisation d'une coordination en phase ou en anti-phase. Lorsque l'axe de rotation est identique pour les deux avant-bras, les auteurs observent des transitions de phase relative de  $180^\circ$  vers  $0^\circ$ , comme pour les expérimentations précédentes sur le système bi-manuel. Par contre, lorsque l'axe de rotation est différent pour les avant-bras droit et gauche, des transitions de la phase vers l'anti-phase sont fréquemment observées, ce qui n'avait pas été constaté auparavant. Les auteurs concluent que lorsque les mouvements sont effectués dans un contexte mécanique approprié, le patron de coordination en phase peut être moins stable que le patron en anti-phase. La dynamique intrinsèque est donc dépendante des contraintes neuro-musculo-squelettiques.

D'autres études ont examiné le rôle de l'attention sur les patrons intrinsèques grâce à une double tâche associant une tâche de temps de réaction à la coordination bi-manuelle (Monno, Chardenon, Temprado, Zanone, & Laurent, 2000 ; Temprado, Zanone, Monno, Laurent, 1999 ; Zanone, Monno, Temprado, Laurent, 2001). Les résultats montrent que la priorité attentionnelle (instructions demandant de porter la même attention sur les deux tâches ou de privilégier l'une ou l'autre) peuvent modifier la performance des patrons intrinsèques. Le fait de porter l'attention sur la coordination bi-manuelle permet d'augmenter la stabilité de la phase relative et de retarder les transitions de phase. Les auteurs soulignent que les processus attentionnels sont une part indissociable de la dynamique de coordination (e.g., Temprado, 2004).

Mechsner, Kerzel, Knoblich, et Prinz (2001) ont montré que les principes observés jusqu'alors sur la dynamique intrinsèque bi-manuelle pouvaient être démentis en utilisant des buts perceptifs (spatiaux) et non moteurs (musculaires). Pour deux tâches de coordination classiquement utilisées (les oscillations des index et la frappe rythmique des doigts), ils montrent que la tendance à la coordination symétrique est perceptive, spatiale, et qu'elle ne dépend pas des muscles impliqués. De la même façon, dans une tâche de traçage de cercle, des coordinations entre les mouvements des bras droit et gauche traditionnellement vues comme irréalisables sont facilement produites lorsqu'une simple information visuelle est donnée au sujet. Les auteurs suggèrent que les mouvements s'organisent à partir de buts perceptifs, et que la coordination inter-segmentaire correspondante, parfois d'une haute complexité, s'effectue de façon spontanée.

Ces exemples montrent que l'ensemble des éléments constituant la tâche dans laquelle s'exprime la coordination altère l'expression des contraintes qui pèsent sur elle de façon fondamentale. Il reste encore du chemin à parcourir avant de comprendre les conséquences de tous les paramètres qui sont responsables de l'émergence d'un patron de coordination particulier. Dans ce cadre, le cas de l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination est intéressant car il permet d'envisager un processus d'opposition aux tendances préférentielles. Quels sont les mécanismes qui permettent d'apprendre à produire un mode de coordination initialement irréalisable, et quelles sont leurs conséquences sur la dynamique de coordination ?



## **1.2. Approche Dynamique de l'Apprentissage Moteur**

L'apprentissage est une capacité formidable particulièrement développée chez l'être humain. Cette faculté à engendrer de nouveaux états de coordination permet de répondre à l'évolution des multiples contraintes agissant sur l'organisme et d'optimiser le comportement adopté au regard de la situation considérée. L'apprentissage est un processus qui fournit une possibilité d'adaptation aux circonstances, une flexibilité comportementale remarquable. "De façon générale, on dira qu'il y a apprentissage lorsqu'un organisme, placé plusieurs fois dans la même situation, modifie sa conduite de façon systématique et relativement durable" (Reuchlin, 1977, p.125). Le processus d'apprentissage moteur mène au comportement habile, c'est-à-dire à un comportement efficient d'une haute précision temporelle et spatiale. La théorie dynamique de l'apprentissage moteur dans laquelle s'inscrit notre travail étudie ce processus d'acquisition en mettant l'accent sur ses origines et conséquences. Comme pour les théories du contrôle moteur, elle suit une démarche différente de celle empruntée par les théories de l'apprentissage plus anciennes (voir Newell, 1991 ; Schmidt & Fitzpatrick, 1996, pour des revues). Nous présentons ici les aspects théoriques (partie 1.2.1.) et expérimentaux (partie 1.2.2.) de cette approche.

### 1.2.1. Perspectives théoriques

#### **1.2.1.1. Fondements de l'approche**

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence que la dynamique de coordination présente des tendances, des modes préférentiels parmi l'ensemble des possibles. Profondément ancrée dans cette démarche théorique, l'approche dynamique de l'apprentissage moteur a pour principe clé de considérer l'acquisition de nouveaux patrons dans le contexte des tendances de coordination préexistantes. Ainsi, un des premiers problèmes posé concerne l'exécution d'un mode de coordination qui ne correspond pas aux tendances décrites précédemment.

L'approche dynamique de l'apprentissage moteur a été élaborée et développée par Kelso, Schöner, et Zanone à partir de réflexions théoriques (Schöner, 1989 ; Schöner & Kelso, 1988 ; Schöner et al., 1992 ; Zanone & Kelso, 1994) et d'observations expérimentales (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1992b, 1997). Une

particularité de cette approche est qu'elle repose sur les concepts de *dynamique intrinsèque* et d'*information comportementale* que nous avons défini précédemment. Le concept de dynamique intrinsèque (les tendances de coordination préférées et stables de l'organisme qui existent à un moment donné), permet d'envisager l'apprentissage moteur sur la base des capacités déjà existantes. L'information comportementale correspond à une exigence de coordination spécifique, relative au patron à produire. Les tendances intrinsèques et les informations comportementales peuvent être envisagées comme des forces agissant simultanément sur le système d'action (Schöner & Kelso, 1988). La mesure dans laquelle ces forces coopèrent ou rivalisent détermine les patrons de coordination observés. Il y a *coopération* lorsque l'information comportementale requiert un mode qui coïncide avec un état stable déjà existant de la dynamique intrinsèque. L'état résultant est alors très stable. Dans le cas inverse, qui se présente en particulier lors de situations d'apprentissage, l'information comportementale entre en *compétition* avec la dynamique intrinsèque. Ce conflit entre dynamique intrinsèque et exigences extrinsèques mène à d'importantes fluctuations de l'état de coordination résultant et donc, à une faible stabilité.

Une implication théorique primordiale du principe de coopération / compétition est que l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination (i.e., ne coïncidant pas avec un état préexistant) n'implique pas seulement des changements spécifiques au patron pratiqué, mais une modification de l'ensemble de la dynamique intrinsèque. Cette modification permettra notamment la diminution du phénomène de compétition qui peut être occasionné par le patron à apprendre. Ainsi, non seulement la connaissance de la dynamique de coordination préexistante devient essentielle pour connaître les contraintes pesant sur le processus d'apprentissage, mais elle permet aussi d'évaluer les conséquences de cet apprentissage sur les tendances de coordination initiales. Comprendre le processus d'apprentissage nécessite l'étude de l'interaction entre la dynamique de coordination préexistante et le patron à apprendre : la dynamique de coordination affecte et est affectée par l'acquisition d'un nouveau patron de coordination.

Dans cette perspective, l'apprentissage peut être défini comme étant le processus par lequel l'information comportementale environnementale spécifiant le patron à apprendre devient l'information comportementale mémorisée (Zanone & Kelso, 1992a, p. 404). Il s'ensuit un changement persistant du comportement de coordination en direction

du patron à apprendre. Autrement dit, l'apprentissage est le changement de la dynamique de coordination qui produit, avec l'information comportementale mémorisée correspondante, l'émergence du patron à apprendre (Schöner et al., 1992, p. 36). Il est prévu que le passage de l'information environnementale à l'information mémorisée provoque la modification de l'ensemble de la dynamique intrinsèque. Le processus d'apprentissage mène à l'apparition d'un nouveau bassin d'attraction autour de la phase relative pratiquée, mais aussi à la perte de stabilité du patron intrinsèque le moins stable (Schöner, 1989 ; Schöner & Kelso, 1988 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1994).

Une conséquence méthodologique de ces fondements théoriques est qu'il est important de connaître l'ensemble de la dynamique intrinsèque avant et au cours de la pratique, afin de comprendre l'évolution et les conséquences du processus d'apprentissage. Dans ce but, Zanone et Kelso (e.g., 1992a, 1994) préconisent l'utilisation de la méthode expérimentale du balayage. Développée à l'origine dans les travaux expérimentaux de Yamanishi et al. (1980) et de Tuller et Kelso (1989), le balayage consiste à demander aux sujets de produire successivement plusieurs patrons de phase relative qui diffèrent d'un intervalle relativement faible (voir la partie 1.1.8.). Il devient alors possible d'explorer l'ensemble du diagramme de phase à n'importe quel moment du processus d'apprentissage afin d'observer les conséquences de la pratique sur la disposition des attracteurs.

#### **1.2.1.2. Modélisation de l'apprentissage**

De la même façon que l'approche dynamique du contrôle moteur dans laquelle elle s'inscrit, la perspective dynamique de l'apprentissage cherche à modéliser de façon théorique l'évolution des phénomènes qu'elle étudie. Le modèle HKB constitue une base à la modélisation du processus d'apprentissage, mais nécessite d'importantes extensions, et principalement de s'adapter aux situations dans lesquelles une information comportementale est présente (i.e., lorsqu'un patron exigé est spécifié par l'environnement ou par la mémoire).

Schöner et Kelso (1988) proposent une modélisation du principe de coopération / compétition entre la dynamique intrinsèque et l'information comportementale sur la base des expérimentations de Yamanishi et al. (1980) et de Tuller et Kelso (soumis en 1987 et publié en 1989) sur les coordinations bi-manuelles. En effet, le modèle original (Haken et

al., 1985 ; Schöner et al., 1986) ne permet pas l'apparition d'un nouvel attracteur dans le diagramme de phase. Or, l'individu est capable de s'adapter, d'ajuster son comportement aux diverses exigences (environnementales, intentionnelles) pouvant l'astreindre. Schöner et Kelso (1988) ajoutent le terme  $\psi$  au modèle HKB afin de représenter l'information comportementale qui exige une phase relative spécifiée par l'environnement ou par la mémoire. Ce terme attire la variable collective vers le patron requis. Dans le cas de membres homologues ( $\Delta\omega = 0$ , voir l'équation 2), la fonction potentielle correspondante prend la forme

$$V(\phi) = -a\cos(\phi) - b\cos(2\phi) - c\cos(\phi - \psi) \quad (3)$$

où  $-a\cos(\phi) - b\cos(2\phi)$  correspond à la dynamique intrinsèque sous l'influence d'un paramètre de contrôle  $b/a$  (voir l'équation 1). Le terme  $\psi$  représente la phase relative exigée (information comportementale environnementale, intentionnelle ou mémorisée), et le paramètre  $c$  représente la force avec laquelle l'information comportementale agit sur la dynamique de coordination (Schöner & Kelso, 1988). Cette formalisation rend compte du principe de coopération / compétition : lorsque les deux termes coïncident (i.e., la phase relative exigée correspond à un des attracteurs intrinsèques), ils attirent le système vers le même patron ; alors que s'ils diffèrent, la compétition instaurée mènera à une déviation du patron de coordination produit par rapport à la phase relative exigée en direction de l'attracteur le plus proche. Dans ce deuxième cas, une instabilité du patron de coordination produit est attendue.

Le processus d'apprentissage, par lequel l'information comportementale environnementale devient mémorisée, va augmenter l'influence du patron requis par rapport à la dynamique intrinsèque (paramètre  $c$ ). La Figure 1.6. montre que, lorsque le patron requis est instable initialement, cette évolution a pour conséquence un changement qualitatif de la dynamique de coordination, c'est-à-dire une transition de phase : l'augmentation du paramètre  $c$  mène à la création d'un nouvel état attracteur correspondant au patron appris, et à la perte de stabilité des patrons attracteurs initiaux (Zanone & Kelso, 1992a, 1994). Cette prédiction théorique, ainsi que d'autres caractéristiques du changement de la dynamique intrinsèque provoqué par l'apprentissage d'une nouvelle coordination, sont détaillées ci-dessous.

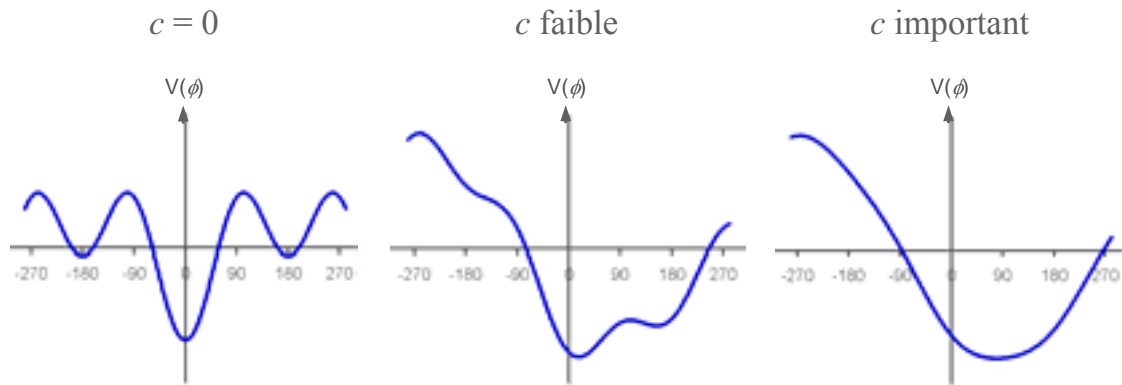


Figure 1.6. Evolution de la fonction potentielle  $V(\phi)$  en fonction de la valeur du paramètre  $c$  (force de l'information comportementale), qui augmente au cours du processus d'apprentissage. Dans cet exemple, la phase relative spécifiée par l'information comportementale est de  $90^\circ$ .

### 1.2.1.3. Prédictions théoriques

Le fait de considérer que l'ensemble de la disposition des attracteurs est modifié avec l'apprentissage mène à certaines conséquences théoriques spécifiques, notamment la déstabilisation des modes de coordination préexistants en conséquence de l'apprentissage, et le transfert de la coordination apprise à d'autres patrons. Dans cette partie, nous présentons certaines prédictions soulevées par les principes de base de l'approche dynamique. Ces prédictions permettent de soumettre la théorie au test expérimental. Grâce à la fonction potentielle, il est possible de représenter schématiquement les hypothèses soulevées afin de mieux les comprendre. Cette représentation du diagramme de phase permet d'exprimer la position des bassins attracteurs du système, ainsi que leur profondeur, indicatrice de stabilité.

Les deux premiers points que nous abordons concernent l'influence de la dynamique intrinsèque sur le processus d'apprentissage, et à l'inverse, les deux derniers décrivent l'influence de l'apprentissage d'un nouveau mode sur la dynamique de coordination sous-jacente. Bien que certaines prédictions théoriques émanent de résultats expérimentaux obtenus sur les coordinations bi-manuelles, les principes énoncés s'adressent à des études théoriques générales (e.g., Schöner & Kelso, 1988).

### 1.2.1.3.1. Evolution des caractéristiques du patron produit durant l'apprentissage

#### - Attraction vers les patrons préférés au début de l'apprentissage

Une première conséquence du principe de coopération / compétition est que les coordinations produites sont attirées vers les modes préexistants au début de l'apprentissage (e.g., Schöner et al., 1992 ; Walter & Swinnen, 1992 ; Zanone & Kelso, 1992a). Ainsi, lorsque l'apprenant doit produire un mode de coordination instable, une forte tendance initiale à produire un patron préféré est attendue. La pratique devrait permettre de réduire cette attraction afin de pouvoir exécuter la coordination requise.

#### - Itinéraires d'apprentissage

Zanone et Kelso (1994) décrivent différentes évolutions du diagramme de phase pouvant apparaître lors de l'acquisition d'un nouveau mode de coordination. Le premier itinéraire d'apprentissage correspond à la création d'un nouvel attracteur, distinct des attracteurs préexistants, modifiant ainsi la dynamique intrinsèque bistable initiale (à  $\phi_{rel} = 0^\circ$  et  $180^\circ$ ) en dynamique tristable. Le deuxième itinéraire possible implique une bifurcation, une transformation brusque du diagramme de phase : un des attracteurs initiaux est déstabilisé lors de la création d'un nouveau bassin d'attraction autour du patron appris. Le troisième scénario voit le déplacement progressif d'un attracteur initial jusqu'à la valeur de phase relative requise. La quatrième possibilité est l'absence d'apprentissage, c'est à dire qu'aucune modification du diagramme de phase n'a lieu, dû à la compétition non résolue entre le patron à apprendre et la dynamique intrinsèque.

Il est proposé que l'itinéraire d'apprentissage emprunté dépend de l'importance de la compétition entre la phase relative requise et la dynamique intrinsèque, et en particulier de la distance entre la coordination requise et les attracteurs initiaux (Zanone & Kelso, 1992a, 1994 ; Zanone & Kostrubiec, 2004). Cette prédiction est présentée dans la Figure 1.7. Si la distance est importante, l'apprentissage de la coordination mènera à des changements brusques (deuxième itinéraire présenté ci-dessus). Par contre, si la distance est faible (i.e., exigence de tâche proche d'un état préexistant), son apprentissage transformera le diagramme de phase de façon plus régulière (troisième itinéraire présenté ci-dessus). Ainsi, la théorie prévoit que la connaissance de la dynamique intrinsèque individuelle, et ainsi, de l'importance de la compétition générée par une coordination à apprendre donnée, permet de

prédire son évolution lors de la pratique d'un patron particulier (Schöner & Kelso, 1988 ; Zanone & Kelso, 1992a).

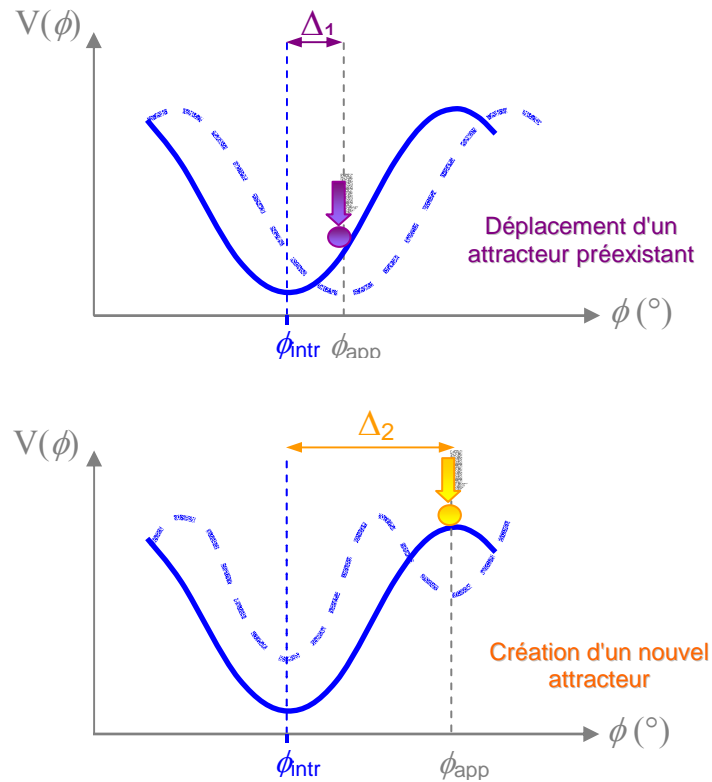


Figure 1.7. Représentation schématique de la prédiction théorique annonçant que lorsque le patron à apprendre est proche de l'attracteur intrinsèque, l'apprentissage est continu en raison du déplacement de l'attracteur préexistant, tandis que lorsqu'il est loin, l'apprentissage mène à une bifurcation de la dynamique intrinsèque (Zanone & Kelso, 1994 ; Zanone & Kostrubiec, 2004). Comme pour les Figures 1.5. et 1.6. (paragraphes 1.1.9. et 1.2.1.2), la bille représentant l'état du système est attirée vers les valeurs les plus basses de la fonction potentielle. La dynamique intrinsèque initiale est représentée par la courbe pleine et sa modification, consécutive à l'apprentissage, est représentée en pointillés. En haut : Pour une faible distance  $\Delta_1$  entre le patron intrinsèque  $\phi_{intr}$  et la coordination à apprendre  $\phi_{app}$ , l'apprentissage mène à un déplacement de l'attracteur préexistant. En bas : Pour une distance  $\Delta_2$  importante entre le patron intrinsèque  $\phi_{intr}$  et la coordination à apprendre  $\phi_{app}$ , l'apprentissage mène à la création d'un nouvel état attracteur.

### 1.2.1.3.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ?

Chaque mouvement coordonné s'exprime dans le cadre de la dynamique de coordination sous-jacente. La capacité à apprendre est donc affectée par les tendances de coordination préférées et stables du système, et particulièrement, par leur attractivité. La vitesse d'apprentissage varierait de façon inverse à la stabilité de l'état attracteur le plus proche de la coordination à apprendre (e.g., Zanone & Kelso, 1994, p. 482). En conséquence, on attend un apprentissage plus rapide lorsque le patron à apprendre est plus proche de l'état attracteur le moins stable que de l'état le plus stable du diagramme de phase (Figure 1.8.). Par exemple, dans le cas des coordinations bi-manuelles où les deux états attracteurs  $0^\circ$  et  $180^\circ$  présentent une différence de stabilité, avec  $0^\circ$  plus stable que  $180^\circ$ ,  $135^\circ$  (i.e., éloigné de  $45^\circ$  par rapport à l'attracteur en anti-phase) devrait être plus rapidement appris que  $45^\circ$  (situé à  $45^\circ$  de l'attracteur en phase).

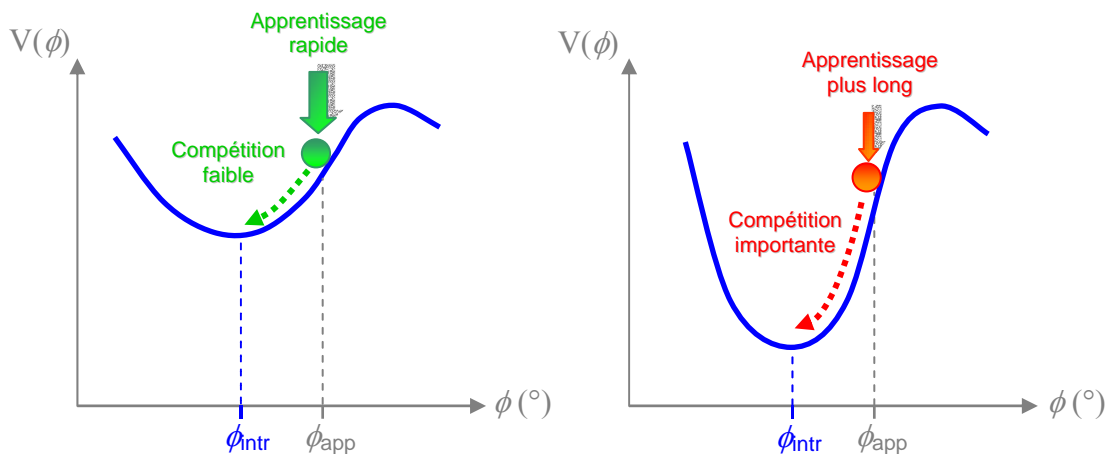


Figure 1.8. Représentation schématique de la prédiction théorique annonçant que la vitesse d'apprentissage varierait de façon inverse à la stabilité de l'attracteur intrinsèque le plus proche du patron exigé (Zanone & Kelso, 1992a, 1994). A gauche : lorsque l'attracteur intrinsèque  $\phi_{intr}$  est peu stable, la compétition entre la dynamique intrinsèque et le patron à apprendre  $\phi_{app}$  est faible, ce qui permet un apprentissage rapide de la nouvelle coordination. A droite : lorsque l'attracteur intrinsèque  $\phi_{intr}$  est très stable, la compétition entre la dynamique intrinsèque et le patron à apprendre  $\phi_{app}$  est forte, ce qui implique un apprentissage plus long et plus difficile de la nouvelle coordination.



Toujours dans le cadre du modèle de coopération / compétition (Schöner, 1989 ; Zanone & Kelso, 1994), plus la distance  $\Delta$  entre le patron à apprendre et l'attracteur intrinsèque le plus proche est importante, plus la compétition devrait être grande (Figure 1.9.). Lorsque la distance  $\Delta$  augmente, on attend donc un patron produit de moins en moins stable, de moins en moins précis par rapport au patron exigé, ainsi qu'un apprentissage de plus en plus long (e.g., Kostrubiec & Zanone, 2002, p. 194).

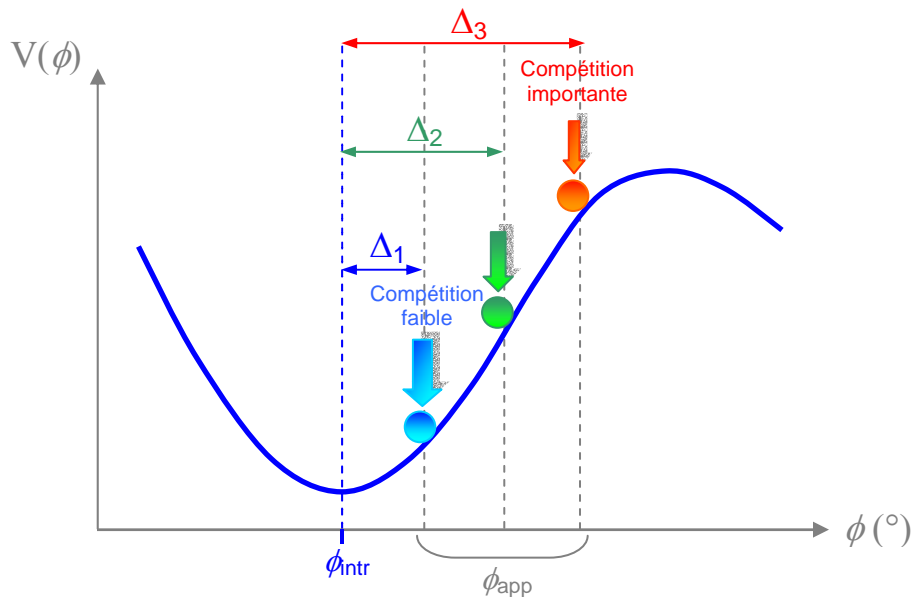


Figure 1.9. Représentation schématique de la prédiction théorique annonçant que plus la distance  $\Delta$  entre l'attracteur intrinsèque le plus proche et le patron à apprendre est grande, plus le phénomène de compétition est important. On attend donc que la précision, la stabilité et la vitesse d'apprentissage du nouveau mode de coordination varient de façon inversement proportionnelle à la distance  $\Delta$  (Kostrubiec & Zanone, 2002).

### 1.2.1.3.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation des attracteurs initiaux

Le principe de déstabilisation des attracteurs initiaux est lié aux itinéraires d'apprentissage décrits précédemment. La création d'un nouvel attracteur autour de la coordination à apprendre menant à une déformation de l'ensemble de la dynamique

intrinsèque, l'apprentissage peut avoir pour conséquence une perte de stabilité de l'attracteur initial le moins stable (Zanone & Kelso, 1992a, 1994). Le processus d'apprentissage ne correspondrait donc pas à l'addition d'un nouveau mode de coordination aux autres modes déjà stables, mais aurait un effet néfaste sur ceux-ci. Nous verrons par la suite les conséquences d'une telle prédiction théorique sur un concept clé de l'apprentissage qu'est l'expertise.

#### 1.2.1.3.4. Transfert d'apprentissage

Le transfert d'apprentissage, la capacité des individus à produire le mouvement appris dans un nouveau contexte ou sous de nouvelles contraintes, est une question récurrente dans le domaine de l'apprentissage moteur. Son étude est primordiale pour comprendre le degré d'abstraction de ce qui est appris. Le terme très général de transfert d'apprentissage renvoie à la question suivante : dans quelle mesure l'habileté acquise est dépendante des conditions particulières dans lesquelles elle a été pratiquée ? Cette question peut être investiguée sous plusieurs angles. Trois catégories principales se dégagent des études réalisées sur ce thème : le transfert vers une coordination différente à la coordination apprise (e.g., transfert du patron pratiqué de 90° au patron non pratiqué de 270°), le transfert de la coordination apprise vers de nouveaux systèmes effecteurs (e.g., transfert du mode de 90° pratiqué avec les bras à son exécution avec les jambes), et le transfert de la coordination apprise lors de nouvelles conditions de réalisation (e.g., exécution de la coordination sous de nouvelles conditions de feedback<sup>5</sup>). Nous pouvons ainsi distinguer le transfert inter-tâche, entre deux tâches différentes, qui comprend les deux premières catégories précitées, et le transfert intra-tâche qui correspond à la troisième catégorie. L'évaluation du transfert intra-tâche se fait lorsqu'une même coordination est réalisée dans conditions environnementales différentes, dans des conditions de feedback différentes, ou lorsque de nouveaux paramètres (e.g., vitesse d'exécution ou amplitude de mouvement) sont spécifiés. Quelque soit la façon dont il est investigué, le transfert est

---

<sup>5</sup> Le terme de feedback renvoie aux informations qui renseignent l'exécutant sur la justesse son action. Deux catégories de feedback sont généralement distinguées. D'une part, le feedback peut être intrinsèque, c'est-à-dire inhérent à la situation. Cette catégorie comprend toutes les informations sensorielles qui sont la conséquence naturelle de la réalisation de l'action. Par exemple, le simple fait de voir ou de sentir ses membres se mouvoir est un feedback intrinsèque. D'autre part, le feedback peut être extrinsèque, c'est-à-dire ajouté par une source externe à la personne qui réalise l'action. L'information disponible pour l'exécutant peut donc être enrichie afin qu'il puisse corriger son action de façon plus précise qu'avec le feedback intrinsèque seul. C'est pourquoi ce type de feedback est si souvent utilisé lors de l'apprentissage d'une habileté. Cette deuxième catégorie est aussi appelée *feedback augmenté*. C'est le terme que nous utiliserons dans la suite de ce travail.

depuis longtemps l'objet d'étude des approches de l'apprentissage plus "classiques", mais l'approche dynamique apporte des éléments nouveaux à sa compréhension.

- Transfert entre différentes coordinations

L'apprentissage d'une coordination particulière peut-il se généraliser à d'autres patrons de coordination qui n'ont pas été pratiqués ? Les résultats expérimentaux de Zanone et Kelso (1992b, 1997) montrent que le patron de coordination symétrique au patron appris se stabilise sans qu'il soit pratiqué. Par exemple, l'apprentissage de  $\phi_{rel} = 90^\circ$  permettrait que  $\phi_{rel} = 270^\circ$  devienne lui aussi un état attracteur. Zanone et Kelso (1992b, 1997) proposent que ce transfert a lieu dans le but de préserver la symétrie de la dynamique de coordination. Un patron donné et son symétrique peuvent être définis par la même valeur de phase relative, mais avec un ordre différent au niveau du mouvement des composants. Considérons par exemple, un retard de  $45^\circ$  de phase relative du bras gauche par rapport au bras droit. Le symétrique de ce patron de coordination,  $-45^\circ$  (i.e.,  $315^\circ$ ), correspond aussi à une phase relative de  $45^\circ$  si on considère que le bras gauche est maintenant en avance. Une autre façon d'exprimer le principe de conservation de symétrie est donc que la phase relative se stabilise indépendamment de l'ordre entre les composants (Zanone & Kelso, 1994, 1997).

- Transfert entre différents systèmes effecteurs

Le problème du transfert entre deux systèmes effecteurs n'est pas spécifique au domaine de l'apprentissage moteur. Il renvoie très directement au principe d'équivalence motrice, développé depuis longtemps dans l'étude du contrôle moteur (e.g., Lashley, 1930). Ce principe exprime le fait qu'un but spécifique peut être accompli avec des patrons de mouvement variés et que des effecteurs différents peuvent donc être utilisés pour réaliser le même but spatial. L'exemple de l'écriture d'un même mot avec différents effecteurs – crayon dans la main droite, dans la main gauche, dans la bouche, ou accroché au pied (Lashley, 1942 ; Raibert, 1977) – est souvent utilisé pour illustrer ce phénomène. En 1994, Zanone et Kelso font la prédiction théorique que le patron de coordination appris est indépendant du système effecteur ayant pratiqué le mouvement. Les résultats obtenus par la suite (Kelso & Zanone, 2002) soutiennent cette prédiction. L'apprentissage d'une phase relative entre les bras se transfère à son exécution avec les jambes et inversement. Il ne s'agit pas seulement d'une amélioration de la performance sur le patron à apprendre pour

les deux systèmes effecteurs. Le transfert va jusqu'à modifier de la même façon les dynamiques de coordination des bras et des jambes (Kelso & Zanone, 2002).

- Transfert entre différentes conditions de réalisation

Contrairement aux deux types de transfert décrits ci-dessus, le transfert entre différentes conditions de réalisation n'est pas un sujet de prédiction dans l'approche dynamique de l'apprentissage. Ce transfert a plutôt été investigué par l'approche "cognitive" de l'apprentissage moteur, dans le but d'appréhender si une tâche pouvait être réalisée dans des conditions d'exécution différentes de celles de la phase d'acquisition (voir Schmidt & Lee, 1998, p. 403 et suivantes pour une revue). Néanmoins, nous verrons par la suite que plusieurs études s'inscrivant dans un cadre dynamique se sont intéressées à ce problème.

**1.2.1.4. Questions engendrées par ces principes théoriques**

Les réflexions théoriques que nous venons de présenter concernent des phénomènes et des événements assez précis. Nous présentons ici quelques unes de leurs conséquences, plus générales, sur certains concepts propres au problème de l'apprentissage moteur.

**1.2.1.4.1. L'expertise : la spécificité empêche-t-elle la flexibilité ?**

Qu'implique la prédiction de déstabilisation des modes de coordination initiaux sur le concept d'expertise ? Une personne est qualifiée d'experte pour une tâche donnée lorsqu'elle a appris à produire une habileté avec une haute précision spatio-temporelle. Que signifie cette définition en terme de dynamique intrinsèque ? Une réponse instinctive serait de dire que l'expert a développé un bassin d'attraction important autour de l'habileté de coordination qu'il a développé. Dans ce cas, nous pouvons dire d'une part, qu'il aura sans doute de grandes difficultés à sortir de cet attracteur pour produire d'autres modes de coordination, mais aussi que les coordinations spontanées qu'il savait produire avant son apprentissage ne sont dès lors, plus stables. La question peut être formulée autrement : l'expert ne sait-il produire "qu'une" habileté de façon très précise et très stable ou est-il capable de s'adapter facilement à de nouvelles exigences de coordination ? Cette question n'est pas nouvelle (Schmidt, 1982) et n'est pas exclusivement la conséquence des réflexions de l'approche dynamique. Néanmoins, la théorie dynamique de l'apprentissage moteur fournit des outils intéressants qui peuvent permettre de mieux appréhender ce problème.

Dans la même optique, le problème suivant peut aussi être soulevé : pouvons-nous apprendre à produire de façon stable l'ensemble des modes de coordination possibles ou sommes-nous limités dans le nombre de coordinations pouvant être maîtrisées ? En effet, à quoi ressemblerait la dynamique intrinsèque d'un individu qui saurait exécuter de façon stable toutes les coordinations inter-segmentaires pour un système effecteur donné (comme c'est le cas pour un pianiste par exemple) ?

#### **1.2.1.4.2. De quoi dépend la capacité à apprendre ?**

Cette question est liée à celles présentées ci-dessus. Selon la théorie, il est possible de prédire la rapidité du processus d'apprentissage à partir de la connaissance de la dynamique intrinsèque. Par exemple, il est avancé que plus l'attracteur intrinsèque proche de la coordination à apprendre est stable, plus l'apprentissage du nouveau patron sera difficile (Zanone & Kelso, 1994). Dans cette logique, un individu ayant fortement stabilisé une coordination particulière aura plus de difficulté à apprendre une nouvelle coordination qu'un individu qui n'a pas de tendances intrinsèques très prononcées. Sur un versant pratique, ce problème peut être rapproché des soucis posés par les "mauvais apprentissages". Les entraîneurs sportifs s'accordent à dire qu'ils préfèrent former des athlètes qui n'ont aucune base plutôt que de mauvaises bases. Un mouvement (sportif ou autre) qui est répété pendant des années se stabilise fortement. Si le mouvement qui est consolidé n'est pas souhaitable, pas fonctionnel, il présentera un frein à l'apprentissage du mouvement le plus efficace car il sera difficile de perdre cette "mauvaise habitude" (e.g., Walter & Swinnen, 1994). Ces considérations semblent assez consensuelles, mais si on considère cette fois (ou plutôt de nouveau) une coordination développée par un expert, il semble moins incontestable qu'un expert ait plus de difficultés qu'un autre à apprendre un nouveau mode de coordination. La question reste ouverte.

#### **1.2.1.4.3. Importance des différences inter-individuelles**

Le fait de poser la dynamique intrinsèque et son évolution comme base à la compréhension du processus d'apprentissage amène logiquement à souligner l'importance des différences individuelles. En effet, chaque individu possède une dynamique intrinsèque propre qui peut dépendre de nombreux facteurs (facteurs innés, propriétés physiques, expériences antérieures...). Or, nous avons montré que la connaissance de cette dynamique intrinsèque permettait d'identifier l'importance de la compétition que présenterait l'exigence

d'apprentissage. Ainsi, connaître la dynamique intrinsèque permettrait non seulement de comprendre comment évolue le processus d'apprentissage, mais aussi de le prévoir. Zanone et Kelso (1992a, 1994, 1997) insistent sur le fait que *l'individu est l'unité d'analyse*. Pour illustrer l'intérêt des analyses individuelles, ils prennent pour exemple deux individus présentant un apprentissage rapide pour l'un, et beaucoup plus lent pour l'autre (Zanone & Kelso, 1992a). Sans une théorie des différences individuelles, les deux types de comportement seraient moyennés en un temps d'apprentissage intermédiaire, on ne saurait donc pas que les participants ont présenté des comportements différents, et encore moins pourquoi l'apprentissage est rapide dans un cas et pas dans l'autre. Il est important de souligner que le fait de prendre en compte la dynamique de coordination individuelle n'est pas contradictoire à l'identification de principes généraux au processus d'apprentissage (Zanone & Kelso, 1994, 1997). Ces principes, sous-jacents chez tous les individus, permettraient notamment de prédire l'évolution de la dynamique d'apprentissage en fonction de la dynamique de coordination initiale et des exigences du patron à apprendre.

Lee, Swinnen et Verschueren (1995) soulignent cet aspect important de la stratégie de Zanone et Kelso, en l'opposant aux traditions dominantes des approches classiques. En effet, les études plus traditionnelles de l'apprentissage moteur s'intéressaient aux changements de performance chez un groupe d'individus. Dans ce cadre, les différences individuelles, étaient considérées gênantes et devaient être évitées en utilisant, par exemple, des tâches aussi nouvelles que possibles. En minimisant au maximum l'expérience antérieure des participants sur la tâche utilisée, les expérimentateurs avaient pour but de minimiser les différences individuelles avant la pratique. Au contraire, l'approche développée par Zanone et Kelso met l'accent sur la richesse de l'information recueillie par l'analyse des différences individuelles, ce qui fournit une base puissante à la compréhension de l'apprentissage à partir de l'analyse intra-sujet (Lee et al., 1995, p. 273).

### 1.2.2. Observations expérimentales

Nous présentons ici plusieurs expérimentations ayant étudié l'apprentissage moteur dans le cadre de l'approche dynamique. Leur but fondamental commun est de comprendre les interactions entre la dynamique intrinsèque et l'apprentissage d'un nouveau mode de

coordination. Bien que différentes questions soient posées, elles renvoient pour la plupart aux différentes prédictions théoriques faites par Zanone et Kelso (e.g., 1994).

### 1.2.2.1. Tableau de présentation

Les différentes expérimentations sont présentées sous forme de tableau afin de décrire leur(s) objectif(s), protocole et résultats de façon concise. Nous discuterons l'ensemble des résultats à la suite de ce tableau. Concernant le protocole expérimental, certaines informations essentielles sont relevées pour toutes les études :

(a) Les informations générales, incluant : **la tâche effectuée** (quels sont les segments coordonnés), indiquée en vert ; la fréquence ( $f$ ) et l'amplitude de mouvement imposées ; le nombre de participants,  $N$ . L'amplitude indiquée correspond à l'amplitude pic à pic, c'est-à-dire à la différence de position entre le maximum de flexion et le maximum d'extension.

(b) le contenu de la session d'apprentissage : la(les) **phase(s) relative(s) apprise(s)**, indiquée(s) en rouge ; le nombre de cycles de pratique et le nombre de jours sur lesquels la pratique est répartie. La quantité de pratique est exprimée en nombre de cycles plutôt qu'en nombre d'essais afin de comparer plus facilement les différentes expérimentations.

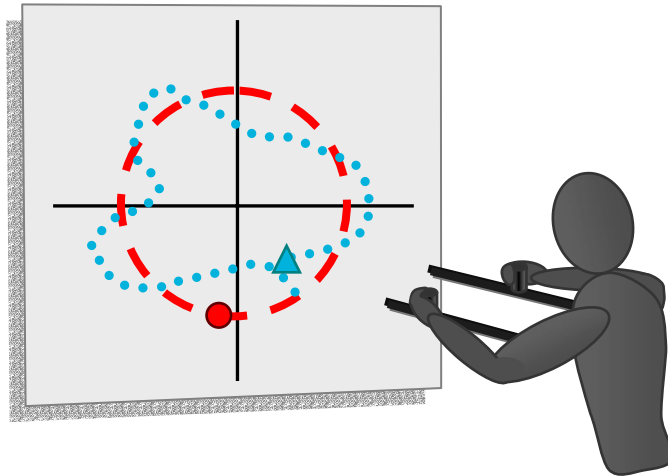
(c) le contenu des sessions de test : la(les) **phase(s) relative(s) testée(s)**, indiquée(s) en rouge ; les moments auxquels les tests sont effectués.

Au moment opportun, des explications surlignées en bleu sont données sur le **moyen utilisé pour exiger la phase relative à produire**. Cette information est fournie de trois façons différentes :

1. La phase relative requise est simplement expliquée et montrée par l'expérimentateur. Le participant ne dispose pas de guidage durant son exécution.

2. La phase relative est spécifiée par des signaux auditifs ou visuels. Dans ce cas, deux métronomes, un pour chaque segment à coordonner, indiquent le moment où le maximum de flexion de chaque articulation doit avoir lieu. La fréquence des deux métronomes est identique, mais leurs pulsations respectives sont décalées de façon à définir une relation de phase particulière. Les métronomes visuels sont constitués de deux diodes électroluminescentes (DELs), l'une étant placée à droite, et l'autre, à gauche du sujet. Les participants doivent faire correspondre la flexion maximale de chaque segment au moment où la diode électroluminescente ipsi-latérale s'allume. Sur le même principe, le signal des métronomes auditifs est fourni aux participants grâce à un casque qui émet un

son dans l'oreille droite pour le mouvement du membre droit et dans l'oreille gauche pour le membre gauche.



*Figure 1.10. Feedback visuel donné au participant par l'intermédiaire de la figure de Lissajous. L'exemple donné ici correspond au protocole de Wenderoth, Bock et Krohn (2002) avec une tâche de flexion-extension des coudes dans le plan horizontal. Les mains déplacent des dispositifs coulissant sur l'axe antéropostérieur. Dans cette expérimentation les participants doivent coordonner les mouvements des bras droit et gauche de façon à faire correspondre le déplacement du triangle bleu au déplacement du rond rouge qui suit une forme de Lissajous invisible pour le participant. Les formes en pointillé représentent le mouvement requis en rouge (ici, une phase relative de  $90^\circ$ ) et le mouvement produit en bleu. Elles ne sont pas disponibles pour le participant dans l'expérimentation de Wenderoth et al. (2002) mais peuvent être utilisées dans d'autres études (voir le tableau de présentation des différentes expérimentations).*

3. La phase relative à produire peut aussi être présentée sous la forme d'un graphique traçant la position d'un segment en fonction de la position de l'autre (Figure 1.10.). Avec cette représentation, appelée figure de Lissajous, chaque phase relative à produire de rapport 1:1 (un cycle du premier segment pour un cycle du deuxième) correspond à une forme elliptique différente, allant du segment de droite au cercle. D'une part, les participants connaissent la forme à produire (un cercle correspondant à  $90^\circ$  de phase relative pour les expérimentations présentées ici), ou voient un curseur suivant la



forme à produire, invisible. D'autre part, ils disposent de la conséquence de leurs propres mouvements sur le graphique. Les mouvements du premier segment ont pour conséquence des mouvements de gauche à droite sur la figure de Lissajous, alors que les mouvements du deuxième segment provoqueront des déplacements de bas en haut. Le moyen utilisé pour exiger la phase relative à produire n'est donc plus un simple signal, mais un feedback augmenté (voir la note de bas de page 5) qui renseigne le participant sur le décalage entre ce qu'il produit et ce qui est attendu.

Les études sont classées par ordre chronologique. Certaines questions posées et résultats sont volontairement omis afin de simplifier la lecture des informations relatives à l'interaction entre coordinations intrinsèques et apprises. Voici enfin, quelques conventions adoptées dans ce tableau. Tout d'abord, toutes les valeurs de phase relative sont données par rapport à la même référence : une valeur de phase relative positive indique une avance du segment droit (doigt, main, bras ou jambe) sur le segment gauche. Ensuite, lorsqu'il est indiqué qu'un test est effectué "après la pratique", cela signifie "à la fin du dernier jour de pratique". Nous indiquons la présence d'un test de rétention lorsque l'intervalle de temps entre la fin de la pratique et le test est plus long. Pour finir, les abréviations suivantes sont utilisées :

$\phi$	Phase relative
$N$	Nombre de participants
App	Apprentissage
$f$	Fréquence de mouvement
gr	Groupes expérimentaux
Expe	Expérimentation
FB	Feedback augmenté

Référence	Objectif(s)	Protocole	Résultats / Discussion									
Zanone & Kelso (1992a)	Investigation des changements qualitatifs de la disposition des attracteurs lors de l'apprentissage d'une phase relative qui, initialement, ne correspond pas à la dynamique intrinsèque, $\phi = 90^\circ$ .	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des index. Amplitude des mouvements non contrainte. Métronomes visuels indiquant la phase relative à produire et imposant <math>f = 1.75</math> Hz. <math>N = 5</math>.</p> <p><b>Apprentissage :</b> <math>\phi = 90^\circ</math>. 2625 cycles sur 5 jours de pratique. Connaissance du résultat donnée après chaque essai.</p> <p><b>Test :</b> 4 fois par jour de pratique, au début, à la fin de chaque jour ainsi qu'entre les blocs d'essais.</p> <p><b>Balayage de <math>\phi = 0^\circ</math> à <math>180^\circ</math>,</b> <math>\phi</math> augmentant par palier de <math>15^\circ</math> (13 <math>\phi</math> testées). Test de rétention une semaine après la pratique : <b>Balayage ; <math>\phi = 90^\circ</math></b> à produire sans les métronomes visuels indiquant la phase relative requise. Pas de connaissance du résultat durant les sessions de test.</p>	<p><b>1.</b> La dynamique intrinsèque initiale bistable (<math>\phi = 0^\circ</math> et <math>\phi = 180^\circ</math>) passe à une dynamique tristable (<math>\phi = 90^\circ</math> devient aussi attracteur). Selon la dynamique intrinsèque initiale du sujet, l'apprentissage de <math>90^\circ</math> mène à plusieurs évolutions de la dynamique intrinsèque, parfois accompagnées par la déstabilisation du patron initial de <math>\phi = 180^\circ</math>.</p> <p><b>2.</b> Les modifications de la dynamique intrinsèque persistent après une semaine.</p>									
Lee, Swinnen, & Verschueren (1995)	<p>(a) Etude de l'acquisition d'un nouveau patron de coordination.</p> <p>(b) Déterminer l'effet de l'apprentissage du nouveau patron sur l'exécution des patrons de coordination préexistants.</p>	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des coudes dans le plan horizontal, de <math>60^\circ</math> avec le bras droit et <math>90^\circ</math> avec le bras gauche. Déplacement des mains sur un axe frontal. Métronome auditif imposant <math>f = 1</math> Hz. <math>N = 10</math>.</p> <p><b>Apprentissage :</b> <math>\phi = 90^\circ</math>. 900 cycles sur 3 jours. FB: <u>À la fin</u> de chaque bloc de 7 essais, figure de Lissajous représentant le patron exigé et le patron produit.</p> <p><b>Test :</b> <math>\phi = 90^\circ</math> testé avant la pratique et à la fin de chaque jour de pratique sous deux conditions de fréquence (<math>f = 1</math> Hz, identique à la pratique, et avec augmentation de <math>f</math> de 1 Hz à 1.53 Hz durant l'essai) ; <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>\phi = 180^\circ</math> sont testés avant toute pratique et à la fin de chaque jour. FB : figure de Lissajous en cours de mouvement montrant la coordination produite (mais pas le patron à produire), disponible pour tous les essais <u>sauf</u> le test de <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>180^\circ</math>, pour lesquels le mouvement à produire est expliqué.</p>	<p><b>1.</b> La plupart des sujets sont déviés vers l'un des patrons intrinsèques au début de la pratique de <math>90^\circ \rightarrow</math> Difficulté à rompre avec les modes de coordination préférés.</p> <p><b>2.</b> Contrairement à ce que proposent Zanone et Kelso (1992a), la pratique du patron de <math>90^\circ</math> ne provoque pas de déstabilisation permanente des patrons de coordination intrinsèques.</p> <p><b>3.</b> L'apprentissage de <math>\phi = 90^\circ</math> s'accompagne d'une acquisition de la capacité à produire ce patron sous l'augmentation de la fréquence d'exécution.</p>									
Fontaine, Lee, & Swinnen (1997)	<p><b>Expe 1 :</b> Influence des patrons intrinsèques sur l'acquisition d'un nouveau patron de coordination.</p> <p><b>Expe 2 :</b> Influence de l'acquisition d'un nouveau patron de coordination sur les patrons intrinsèques.</p>	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des coudes dans le plan horizontal. Déplacement des mains sur un axe frontal. Amplitude de 16 cm. Les participants réalisent <math>\phi</math> à partir d'explications et de démonstrations. Métronome auditif imposant <math>f = 1</math> Hz.</p> <table border="1" data-bbox="712 1125 1480 1279"> <thead> <tr> <th></th> <th>Expe 1 <math>N = 12</math></th> <th>Expe2 <math>N = 7</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>App</b></td> <td>2 gr : <math>\phi = 45^\circ</math> ou <math>135^\circ</math> 2700 cycles sur 4 jours</td> <td><math>\phi = 90^\circ</math> 4000 cycles sur 6 jours</td> </tr> <tr> <td><b>Test</b></td> <td><math>\phi</math> apprise, <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>\phi = 180^\circ</math></td> <td><math>\phi = 90^\circ</math>, <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>\phi = 180^\circ</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>FB : figure de Lissajous fournie à la fin de chaque essai pour les essais d'apprentissage. Pas de FB durant la session de test. Les tests sont menés au début et à la fin de chaque jour de pratique, et 4 semaines après la pratique (test de rétention).</p>		Expe 1 $N = 12$	Expe2 $N = 7$	<b>App</b>	2 gr : $\phi = 45^\circ$ ou $135^\circ$ 2700 cycles sur 4 jours	$\phi = 90^\circ$ 4000 cycles sur 6 jours	<b>Test</b>	$\phi$ apprise, $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$	$\phi = 90^\circ$ , $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$	<p><b>Expe 1 :</b> lorsqu'il y a différence de stabilité entre <math>\phi = 45^\circ</math> et <math>\phi = 135^\circ</math>, ce n'est pas dans le sens prédit par Zanone et Kelso (1994). L'apprentissage ne serait pas plus difficile pour un patron proche de l'attracteur dominant.</p> <p><b>Expe 2 :</b> diminution temporaire de la précision pour les patrons intrinsèques immédiatement après la pratique de <math>\phi = 90^\circ</math> sur chaque jour, mais qui n'est pas permanente. Il est improbable que, dû à un nouvel apprentissage, les anciennes habiletés soient déplacées ou désappries.</p>
	Expe 1 $N = 12$	Expe2 $N = 7$										
<b>App</b>	2 gr : $\phi = 45^\circ$ ou $135^\circ$ 2700 cycles sur 4 jours	$\phi = 90^\circ$ 4000 cycles sur 6 jours										
<b>Test</b>	$\phi$ apprise, $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$	$\phi = 90^\circ$ , $\phi = 0^\circ$ et $\phi = 180^\circ$										

Référence	Objectif(s)	Protocole	Résultats / Discussion
Swinen, Lee, Verschueren, Serrien, & Bogaerds (1997)	<p>(a) Rôle du feedback augmenté sur l'acquisition et la rétention d'un nouveau patron de coordination bi-manuel (<math>\phi = 90^\circ</math>).</p> <p>(b) Influence de l'acquisition de <math>\phi = 90^\circ</math> sur la déstabilisation des modes préférés, <math>0^\circ</math> et <math>180^\circ</math>.</p>	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des coudes dans le plan horizontal. Déplacement des mains sur un axe frontal. Amplitude de <math>80^\circ</math>. Métronomie auditif imposant <math>f = 1</math> Hz. <math>N = 33</math> (répartis dans 3 groupes). <b>Apprentissage :</b> <math>\phi = 90^\circ</math>. 1500 cycles répartis sur 3 jours. 3 gr différenciés par l'information disponible lors de l'apprentissage de <math>90^\circ</math> : yeux bandés; vision normale; ou feedback augmenté (figure de Lissajous). FB pour les 3 gr : <u>À la fin</u> de chaque bloc de 5 essais, figure de Lissajous représentant le patron exigé et le patron produit. <b>Test :</b> (i) <math>\phi = 90^\circ</math> réalisé en condition de vision réduite, normale et augmentée avant, au milieu et à la fin de chaque jour de pratique ; (ii) <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>\phi = 180^\circ</math> sont réalisés après une démonstration des expérimentateurs. Ces patrons sont testés avant toute pratique et à la fin de chaque jour en condition de vision normale. FB: pour l'apprentissage et les tests avec feedback augmenté, figure de Lissajous en continu montrant la coordination produite (mais pas le patron à produire).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Sur la tâche de <math>90^\circ</math>, le groupe feedback augmentée a une performance supérieure aux autres groupes pour tous les tests de transfert.</li> <li><math>0^\circ</math> et <math>180^\circ</math> sont, de façon générale, plus précis et moins variables que <math>90^\circ</math>, <math>0^\circ</math> étant le patron le mieux réalisé. On ne constate pas de variation significative de la précision et de la variabilité des 2 modes de coordination préférés avec la pratique de <math>90^\circ</math>.</li> <li>Un transfert réussi s'opère entre les différentes conditions de feedback.</li> </ol>
Zanone & Kelso (1997)	Caractériser le processus d'apprentissage d'un nouveau patron en terme de changements de la dynamique de coordination, notamment en investiguant le transfert d'apprentissage du patron appris vers son symétrique.	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des index. Amplitude non contrainte. Métronomes visuels indiquant la phase relative à produire et imposant <math>f = 1.25</math> Hz. <math>N = 14</math>. <b>Apprentissage :</b> Le patron à apprendre est déterminé sur une base individuelle de façon à ce qu'il ne corresponde pas à un patron stable déjà existant. <math>\phi</math> apprises = <math>90^\circ</math> (<math>N = 7</math>); <math>270^\circ</math> (<math>N = 5</math>); <math>135^\circ</math> (<math>N = 1</math>); <math>-135^\circ</math> (<math>N = 1</math>). 1250 cycles sur 2 jours de pratique. Connaissance du résultat donnée après chaque essai. <b>Test :</b> Avant, au milieu et après la pratique. Chaque balayage complet (de <math>\phi = 0^\circ</math> à <math>360^\circ</math>) est mené en 2 parties : balayage de <math>\phi = 0^\circ</math> vers <math>+180^\circ</math>, et de <math>\phi = 360^\circ</math> à <math>-180^\circ</math>. <math>\phi</math> est variée par palier de <math>+15^\circ</math> ou <math>-15^\circ</math> (24 <math>\phi</math> testées). Pas de connaissance du résultat durant les sessions de test.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Avec la pratique, importante diminution de l'erreur et de la variabilité de façon similaire pour toutes les valeurs de <math>\phi</math> apprises.</li> <li>Le processus d'apprentissage permet de stabiliser <math>\phi</math> à apprendre et son symétrique non pratiqué. Ce transfert d'apprentissage préserve la symétrie de la dynamique de coordination.</li> <li>L'altération de la disposition de la dynamique due à la pratique est fonction de la bi-stabilité ou de la multi-stabilité de la dynamique avant l'apprentissage.</li> </ol>
Smethurst & Carson (2001)	Effets de l'apprentissage sur l'exécution et la stabilité dynamique des patrons de $90^\circ$ (tâche à apprendre) et de $270^\circ$ (tâche de transfert).	<p><b>Tâche :</b> prono-supination des avant-bras. Métronomes auditifs indiquant la phase relative à produire et <math>f</math>, qui passe de 1.25 Hz à 2.75 Hz par palier de 0.25 Hz (7 plateaux de 8 s). <math>N = 11</math>. <b>Apprentissage :</b> <math>\phi = 90^\circ</math>. 8400 cycles sur 5 jours de pratique. FB : figure de Lissajous en cours de mouvement de la coordination produite (patron à produire non représenté). <b>Test :</b> <math>\phi = 90^\circ</math> et <math>\phi = 270^\circ</math> testé avant et après la pratique. Tests de rétention : 1 semaine puis 8 semaines plus tard. Pas de FB durant la session de test.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>L'amélioration de la stabilité de <math>\phi = 90^\circ</math> avec la pratique est transférable à la performance du patron non pratiqué de <math>270^\circ</math>.</li> <li>Juste après la pratique, <math>\phi = 90^\circ</math> transite vers une variété de phases relatives sous l'augmentation de <math>f</math>. Lors des tests de rétention, <math>\phi = 90^\circ</math> transite vers <math>180^\circ</math>. <math>\phi = 180^\circ</math> peut donc encore être produit après la pratique, mais son attraction est temporairement réprimée.</li> <li><math>\phi = 270^\circ</math> transite vers <math>90^\circ</math> quand <math>f</math> augmente, ce qui démontre l'attractivité du patron appris.</li> </ol>

Référence	Objectif(s)	Protocole	Résultats / Discussion																																			
Amazeen (2002)	<p><b>Expe 1.</b> Comparaison de l'acquisition de <math>\phi = 90^\circ</math> avec des membres ayant des fréquences propres identiques ou différentes.</p> <p><b>Expe 2.</b> Comparaison de l'acquisition et du transfert de 2 <math>\phi</math> différentes : <math>90^\circ</math> et <math>45^\circ</math>.</p> <p><b>Expe 3.</b> L'apprentissage déstabilise-t-il <math>\phi = 0^\circ</math> et <math>180^\circ</math> ?</p>	<p><b>Tâche :</b> maniment de pendules avec les mains (flexion-extension des poignets). La masse et la longueur des pendules sont variées pour obtenir des différences de fréquence propre <math>\Delta\omega</math> (rad.s<sup>-1</sup>) entre les 2 pendules. La phase relative à produire est décrite et montrée par l'expérimentateur. <math>f</math> est libre durant la pratique mais est imposée lors des sessions de tests par un métronome auditif. <math>f</math> est exprimée en pourcentage de la fréquence préférée des pendules, 0.89 Hz.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>Expe 1</th> <th>Expe 2</th> <th>Expe 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">App</td> <td><math>N</math></td> <td>14</td> <td>18</td> <td>8 + 16 de l'Expe2</td> </tr> <tr> <td><math>\phi</math></td> <td><math>\phi = 90^\circ</math></td> <td>2 gr: <math>\phi = 90^\circ</math> ou <math>45^\circ</math></td> <td rowspan="2">3 gr : contrôle; <math>\phi</math> apprise = <math>45^\circ</math>; <math>\phi</math> apprise = <math>90^\circ</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\omega</math></td> <td>2 gr: <math>\Delta\omega = 0</math> ou -1</td> <td><math>\Delta\omega = 0</math></td> </tr> <tr> <td></td> <td>cycles</td> <td><math>\approx 1335</math> sur 2 jours</td> <td><math>\approx 2403</math> sur 3 jours</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Test</td> <td><math>\phi</math></td> <td><math>\phi = 90^\circ</math></td> <td><math>\phi</math> apprise</td> <td><math>\phi = 0^\circ</math> et <math>180^\circ</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\omega</math></td> <td><math>\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2</math></td> <td><math>\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3</math></td> <td><math>\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2</math></td> </tr> <tr> <td><math>f</math></td> <td>80% et 134%</td> <td>75% et 110%</td> <td>80% et 134%</td> </tr> </tbody> </table> <p>Le nombre de cycles de pratique est variable en fonction de la fréquence adoptée par les participants. Les tests sont menés après la pratique. Aucun FB ou connaissance du résultat n'est donnée à aucun moment.</p>			Expe 1	Expe 2	Expe 3	App	$N$	14	18	8 + 16 de l'Expe2	$\phi$	$\phi = 90^\circ$	2 gr: $\phi = 90^\circ$ ou $45^\circ$	3 gr : contrôle; $\phi$ apprise = $45^\circ$ ; $\phi$ apprise = $90^\circ$	$\Delta\omega$	2 gr: $\Delta\omega = 0$ ou -1	$\Delta\omega = 0$		cycles	$\approx 1335$ sur 2 jours	$\approx 2403$ sur 3 jours		Test	$\phi$	$\phi = 90^\circ$	$\phi$ apprise	$\phi = 0^\circ$ et $180^\circ$	$\Delta\omega$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2$	$f$	80% et 134%	75% et 110%	80% et 134%	<p><b>Expe 1.</b> Diminution de l'erreur et de la variabilité avec la pratique. Pas de différence notable entre les 2 gr d'apprentissage <math>\Delta\omega = 0</math> et <math>\Delta\omega = -1</math>. Transfert positif du patron pratiqué vers de nouveaux effecteurs (<math>\Delta\omega</math> différents) et de nouvelles fréquences d'exécution.</p> <p><b>Expe 2.</b> Absence de différence entre l'acquisition de <math>45^\circ</math> et <math>90^\circ</math>. La distance du patron à apprendre par rapport au patron préexistant ne semble pas influencer la facilité à apprendre.</p> <p><b>Expe 3.</b> L'apprentissage altère la performance des participants pour les relations en phase et en anti-phase : diminution de la précision de <math>\phi = 0^\circ</math> en direction de la relation de phase apprise et augmentation de la stabilité de <math>\phi = 180^\circ</math>.</p>
		Expe 1	Expe 2	Expe 3																																		
App	$N$	14	18	8 + 16 de l'Expe2																																		
	$\phi$	$\phi = 90^\circ$	2 gr: $\phi = 90^\circ$ ou $45^\circ$	3 gr : contrôle; $\phi$ apprise = $45^\circ$ ; $\phi$ apprise = $90^\circ$																																		
	$\Delta\omega$	2 gr: $\Delta\omega = 0$ ou -1	$\Delta\omega = 0$																																			
	cycles	$\approx 1335$ sur 2 jours	$\approx 2403$ sur 3 jours																																			
Test	$\phi$	$\phi = 90^\circ$	$\phi$ apprise	$\phi = 0^\circ$ et $180^\circ$																																		
	$\Delta\omega$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3$	$\Delta\omega = 0; \pm 1; \pm 2$																																		
	$f$	80% et 134%	75% et 110%	80% et 134%																																		
Kelso & Zanone (2002)	Etude du transfert de l'apprentissage d'une nouvelle relation de phase pratiquée avec un système effecteur (par exemple les bras), vers un autre système effecteur (par exemple les jambes), et vice versa.	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des coudes ou des genoux dans le plan sagittal. Métronomes visuels indiquant la phase relative à produire et imposant <math>f = 0.8</math> Hz pour les jambes et 1.1 Hz pour les bras. <math>N = 18</math> (dont 6 dans un groupe contrôle, non soumis à la pratique).</p> <p><b>Apprentissage :</b> le patron à apprendre est déterminé sur une base individuelle de façon à ce qu'il ne corresponde pas à un patron stable déjà existant. <math>\phi</math> apprises = <math>90^\circ</math> (<math>N = 4</math>); <math>45^\circ</math> (<math>N = 4</math>); <math>135^\circ</math> (<math>N = 2</math>); <math>75^\circ</math> (<math>N = 2</math>).</p> <p>Pour chaque valeur de <math>\phi</math> apprise, la moitié des participants pratique avec les bras, et l'autre moitié avec les jambes. 1760 cycles répartis sur 2 jours. Connaissance du résultat donnée après chaque essai.</p> <p><b>Test :</b> Avant et après la pratique. <b>Balayage pour les 2 systèmes effecteurs</b> (i.e., les bras et les jambes) de <math>\phi = 0^\circ</math> à <math>180^\circ</math> en 13 étapes (tous les multiples de <math>15^\circ</math> sont testés) présentées de façon randomisée. Pas de connaissance du résultat durant les sessions de test.</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Confirmations des résultats 1., 2. et 3. de Zanone &amp; Kelso (1997).</li> <li>2. L'apprentissage d'une nouvelle phase relative avec un seul système effecteur se transfère spontanément à l'autre, non entraîné.</li> <li>3. Quelque soit le système pratiquant la tâche, l'apprentissage implique une altération de l'ensemble de la dynamique de coordination en direction de l'exigence de la tâche. En accord avec Zanone et Kelso (1992a), <math>\phi = 180^\circ</math> apparaît être déstabilisé (au moins temporairement) dû à l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination.</li> <li>4. Absence de modification pour le groupe contrôle : les effets observés peuvent être attribués à l'apprentissage et à son transfert.</li> </ol>																																			

Référence	Objectif(s)	Protocole	Résultats / Discussion
Kostrubiec & Zanone (2002)	Effets de la distance $\Delta$ entre un patron bi-manuel à apprendre ( $\phi = 90^\circ, 135^\circ$ , ou $158^\circ$ ) et les patrons préexistants $\phi = 0^\circ$ et $180^\circ$ .	<p><b>Tâche :</b> prono-supination des avant-bras.  <b>Métronomes visuels indiquant la phase relative à produire</b> et imposant <math>f = 1</math> Hz. <math>N = 8</math>.</p> <p><b>Apprentissage :</b> 3 <math>\phi</math> consécutives <math>\rightarrow \phi = 90^\circ, \phi = 135^\circ</math>, puis <math>\phi = 158^\circ</math>, correspondant à <math>\Delta = 90^\circ, \Delta = 45^\circ</math> et <math>\Delta = 22^\circ</math>.</p> <p>Pour chaque <math>\phi</math>, un essai de pratique est constitué de 3 tâches consécutives :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\phi</math> à apprendre, métronomes visuels disponibles ;</li> <li>▪ <math>\phi</math> pratiquée, métronomes visuels disponibles sur le début de l'essai uniquement ;</li> <li>▪ les 2 patrons préexistants les plus proches de celui venant d'être pratiqué, métronomes visuels disponibles sur le début de l'essai uniquement.</li> </ul> <p>Quantité de pratique variable selon les sujets : pratique jusqu'à l'atteinte d'un seuil d'erreur (<math>&lt; 12^\circ</math>) et de variabilité (<math>&lt; 20^\circ</math>).</p> <p><b>Test :</b> avant et après la pratique.  <b>Balayage de <math>\phi = 0^\circ</math> à <math>180^\circ</math>,</b> <math>\phi</math> augmentant par palier de <math>15^\circ</math> (13 <math>\phi</math> testées).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. En accord avec le modèle de coopération-compétition, le patron de <math>90^\circ</math> est moins précis que les patrons plus proches de <math>180^\circ</math>;</li> <li>2. Le retrait du stimulus auditif mène à une diminution de précision conséquente;</li> <li>3. Bien qu'il ait été supposé que la vitesse d'apprentissage soit directement proportionnelle à la distance <math>\Delta</math>, les résultats montrent que l'apprentissage est plus rapide lorsque le patron exigé est soit près, soit loin des patrons préexistants comparé au cas où la distance est intermédiaire.</li> </ol>
Wenderoth, Bock, & Krohn (2002)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analyse de l'influence de la <i>distance</i> entre les attracteurs existants et le patron à apprendre sur le processus d'apprentissage.</li> <li>2. Examiner s'il y a une différence d'apprentissage entre une phase relative proche de <math>0^\circ</math> et une phase relative proche <math>180^\circ</math>.</li> <li>3. Quantifier le transfert à partir d'une condition de feedback augmenté vers une condition de feedback normal.</li> </ol>	<p><b>Tâche :</b> flexion-extension des coudes dans le plan horizontal. Déplacement des mains sur un axe antéropostérieur. Amplitude de 18.75 cm. <math>f = 0.5</math> Hz imposée lors du et par le feedback augmenté. <math>N = 25</math> (répartis dans 5 groupes).</p> <p><b>Apprentissage :</b> chaque groupe apprend une phase relative différente située à <math>36^\circ, 60^\circ</math> ou <math>90^\circ</math> des attracteurs <math>0^\circ</math> et <math>180^\circ</math>. 1050 cycles effectués sur 1 jour de pratique. Chaque essai comprend 2 conditions de réalisation, dans l'ordre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Feedback augmenté <math>\rightarrow</math> FB : cible à suivre se déplaçant sur une figure de Lissajous invisible correspondant au patron à produire (vitesse de 2 cycles.s<sup>-1</sup>).</li> <li>- Feedback normal <math>\rightarrow</math> vision normale des bras. Les participants doivent continuer à produire <math>\phi</math> requise sans le feedback augmenté.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Les patrons proches des attracteurs existants sont initialement exécutés de façon plus précise que les autres, mais à la fin de l'apprentissage, les différences spécifiques au patron disparaissent.</li> <li>2. Les patrons proches de <math>0^\circ</math> sont stabilisés de façon plus rapide que les patrons proches de <math>180^\circ</math>. Autrement dit, en accord avec Fontaine et al. (1997), l'attracteur de <math>180^\circ</math> interfère de façon plus importante avec le patron à apprendre que l'attracteur de <math>0^\circ</math>.</li> <li>3. Transfert positif entre les 2 conditions de feedback : la précision et la stabilité des patrons augmentent dans les 2 conditions.</li> </ol>

### 1.2.2.2. Constats généraux

L'analyse de ce tableau permet de faire le constat de plusieurs caractéristiques communes aux dix expérimentations présentées. Nous verrons que quelques unes de ces caractéristiques contrastent parfois avec certains préceptes de l'approche dynamique dans laquelle ces études s'inscrivent.

#### ➤ *Coordinations bi-manuelles.*

Un regard rapide sur les tâches utilisées révèle que toutes les expérimentations les coordinations bi-manuelles comme outil d'analyse. Qu'il s'agisse de flexion-extension des index (Zanone & Kelso, 1992a, 1997), des coudes (Fontaine et al., 1997 ; Kelso & Zanone, 2002 ; Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002), des poignets (Amazeen, 2002), ou de la prono-supination des avant-bras (Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Smethurst & Carson, 2001), les tâches proposées concernent toujours la coordination d'un segment du membre supérieur droit avec son homologue gauche. Seuls Zanone et Kelso (2002) étudient également la coordination entre les mouvements de flexion-extension des deux jambes. Ainsi, non seulement la quasi-totalité des tâches concernent les membres supérieurs, mais seule la coordination de segments corporels identiques est étudiée (i.e., des segments aux propriétés physiques de masse, de taille, de fréquence propre identiques, et mis en mouvement par la contraction de muscles homologues). La seule exception à cette deuxième observation est la tâche d'Amazeen (2002), qui introduit une différence de fréquence propre entre les pendules manipulés par les deux mains. Amazeen (2002) souligne d'ailleurs que si l'apprentissage moteur implique en général la coordination de segments du corps différents plutôt qu'identiques, seuls des membres identiques ( $\Delta\omega = 0$ ) ont été utilisés jusqu'ici dans les expérimentations. Les résultats expérimentaux doivent être appréhendés dans ce cadre.

#### ➤ *Coordinations imposées.*

Les patrons de coordination testés sont toujours requis par information comportementale (instructions, métronomes ou figure de Lissajous) avec bien souvent, un guidage perceptif qui reste présent lorsque les patrons intrinsèques sont testés (Kelso & Zanone, 2002 ; Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997). Autrement, un paramètre spécifique par rapport à la phase relative à produire est toujours donné. Les effets de l'apprentissage sur des patrons de coordination *spontanés* (i.e., des patrons qui émergent alors qu'ils ne constituent pas le but de la tâche pour le participant) ne sont donc pas étudiés. De plus, la coordination est

également contrainte par la fréquence d'exécution qui est imposée dans toutes les expérimentations présentées (sauf pour la session d'apprentissage d'Amazeen, 2002), ainsi que par l'amplitude de mouvement qui est également souvent exigée.

➤ *Investigations de la dynamique intrinsèque.*

Un des principes fondamentaux de la théorie dynamique de l'apprentissage moteur est que l'ensemble de la dynamique intrinsèque est modifié avec l'apprentissage. Les prédictions théoriques telles que la déstabilisation des patrons initiaux et le transfert du mode appris vers son symétrique, sont basées sur ce principe. La méthode du balayage est un outil efficace pour connaître l'ensemble de la dynamique intrinsèque. Pourtant, hormis les études menées par Zanone et ses collaborateurs (Kelso & Zanone, 2002 ; Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997), les expérimentations présentées n'utilisent pas cette méthode.

➤ *Importance des différences individuelles.*

Cette caractéristique n'est pas exposée dans le tableau de présentation, mais plusieurs auteurs soulignent l'importance des différences individuelles. Zanone et Kelso (1992a ; 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) en particulier, mais aussi Amazeen (2002) et Lee et al. (1995). La présentation d'analyses individuelles permet de dévoiler les différences (et parfois l'opposition) des comportements adoptés par les participants.

➤ *Tests de rétention.*

Les tests de rétention permettent d'évaluer le degré avec lequel la performance de mouvement acquise à la fin de la période de pratique, peut être reproduite après un intervalle de temps sans pratique. Sur les 10 expérimentations présentées, seules 3 proposent un test de rétention mené après une semaine d'arrêt de la pratique (Zanone & Kelso, 1992a), quatre semaines (Fontaine et al., 1997), ou une semaine puis huit semaines (Smethurst & Carson, 2001). La persistance des conséquences de l'apprentissage n'est donc pas systématiquement analysée.

### **1.2.2.3. Résultats obtenus et différences selon les études**

Nous proposons ici une discussion des résultats obtenus dans les différentes expérimentations, celles du tableau ainsi que d'autres, pouvant contribuer aux réflexions. Pour cela, nous reprenons le plan adopté dans la partie 1.2.1.3., présentant les prédictions

théoriques de l'approche dynamique. Précisons néanmoins que nous présenterons plusieurs observations expérimentales qui dépassent le cadre de ces prédictions.

### **1.2.2.3.1. Evolution des caractéristiques du patron produit durant l'apprentissage**

L'ensemble des résultats converge vers le fait qu'un patron de coordination initialement instable peut être stabilisé avec la pratique. Nous rapportons ici comment évolue le patron produit afin d'atteindre la valeur de phase relative requise.

#### - Attraction vers les patrons préférés au début de l'apprentissage

Lorsqu'une phase relative autre qu'un patron intrinsèque est requise, le mode de coordination produit est dévié en direction d'un des modes intrinsèques. Il présente de plus, une grande variabilité. Ainsi, au début de la pratique, les résultats montrent une erreur importante de la phase relative produite par rapport à la phase relative requise, en direction du patron intrinsèque en phase ou en anti-phase (e.g., Lee et al., 1995 ; Swinnen et al, 1997 ; Verschueren, Swinnen, Dom, & De Weerdt, 1997 ; Zanone & Kelso, 1992a). Des résultats similaires ont été obtenus avec des mouvements ayant un rapport de fréquence différent de 1:1. Par exemple, lorsque les participants doivent réaliser un mouvement de flexion avec un membre pendant que le deuxième effectue un cycle en plus (flexion-extension-flexion), ils ont une forte tendance à synchroniser les deux membres, c'est-à-dire à bouger en phase (Swinnen, Walter, Lee, & Serrien, 1993 ; Swinnen, Young, Walter, & Serrien, 1991 ; Walter & Swinnen, 1992). Les patrons en phase et en anti-phase attirent le mode de coordination produit lorsqu'une nouvelle phase relative doit être apprise. Ainsi, les résultats expérimentaux concordent pour dire que l'apprentissage de nouvelles habiletés motrices nécessite de lutter contre, de rompre avec les tendances de coordination préférées préexistantes.

#### - Itinéraires d'apprentissage

##### *Amélioration du patron à apprendre.*

Au cours de la pratique, la coordination produite s'améliore de façon significative. Cette amélioration est montrée d'une part par la phase relative produite qui se libère de l'influence des patrons intrinsèques pour évoluer vers la phase relative requise, et d'autre part, par la diminution de l'écart-type de la phase relative (e.g., Amazeen, 2002 ; Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997). Ces évolutions indiquent une amélioration de la précision et de la stabilité du patron de coordination exécuté. Les tests de rétention menés une semaine (Smethurst & Carson, 2001 ;



Zanone & Kelso, 1992a), quatre semaines (Fontaine et al., 1997), et huit semaines après la pratique (Smethurst & Carson, 2001), montrent que ces améliorations persistent dans le temps. Après plusieurs semaines sans pratique, le patron appris peut donc toujours être produit de façon stable et précise. Notons que Wenderoth et Bock (2001), qui comparent l'évolution temporelle de la précision (phase relative moyenne) et de la stabilité (écart-type de la phase relative) de la coordination produite, observent que la première s'améliore plus rapidement que la seconde.

#### *Modifications de l'ensemble de la dynamique intrinsèque.*

Grâce à l'investigation du diagramme de phase avec la méthode de balayage, Zanone et Kelso (1992a, 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) observent que la disposition des attracteurs est modifiée par l'apprentissage du nouveau mode de coordination. La stabilisation du patron à apprendre provoque des modifications de la dynamique de coordination en direction du patron exigé. Nous verrons les conséquences de ces modifications plus précisément dans la partie sur la déstabilisation des attracteurs initiaux. Concernant l'évolution de la dynamique intrinsèque au cours de la pratique, deux itinéraires d'apprentissage sont mis en évidence en fonction des caractéristiques initiales des tendances de coordination (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1997). Lorsque les participants présentent une dynamique bi-stable avant la pratique (i.e., présence d'attracteurs en phase et en anti-phase), l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination a pour conséquence la création d'un nouvel état attracteur au niveau du patron appris. La dynamique devient alors multi-stable. Lorsque les participants sont multi-stables initialement, c'est-à-dire qu'une autre phase relative que  $0^\circ$  et  $180^\circ$  peut être produite avant la session de pratique, l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination mènera au déplacement de ce troisième état stable vers le patron à apprendre. On obtient alors une dynamique multi-stable différente. La différence fondamentale entre ces deux itinéraires d'apprentissage est que dans le premier cas, un nouvel attracteur se *crée* avec la pratique, alors que dans le second cas, un attracteur préexistant est *déplacé* (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1997).

#### **1.2.2.3.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ?**

Deux prédictions principales ont été formulées sur la rapidité du processus d'apprentissage (e.g., Zanone & Kelso, 1994) :

- plus l'attracteur intrinsèque le plus proche de la phase relative à apprendre est stable, plus il entre en compétition avec le processus d'apprentissage. La vitesse avec laquelle les

participants apprennent varie donc de façon inverse à la stabilité de l'attracteur intrinsèque le plus proche du patron exigé. Par exemple, une phase relative de  $45^\circ$  serait plus difficile à apprendre que  $135^\circ$  parce que le patron intrinsèque le plus proche de la première,  $0^\circ$  est plus stable que le patron intrinsèque le plus proche de la deuxième,  $180^\circ$ .

- le degré de compétition est proportionnel à la distance  $\Delta$  entre la phase relative à apprendre et l'attracteur intrinsèque le plus proche. La vitesse d'apprentissage, ainsi que la précision et la stabilité, seraient donc inversement proportionnelles à  $\Delta$ . Par exemple, une phase relative de  $45^\circ$  devrait être plus facilement apprise que  $90^\circ$  parce que sa distance par rapport au patron intrinsèque le plus proche est moins importante.

La facilité à apprendre une nouvelle coordination serait donc, inversement proportionnelle à la *stabilité* de l'attracteur le plus proche, d'une part, et à sa *distance* par rapport à celui-ci, d'autre part. Plusieurs expérimentations ont cherché à tester ces prédictions. Fontaine et al. (1997) et Wenderoth et al. (2002) s'intéressent à la première, relative à la stabilité. Les résultats de ces deux expérimentations s'opposent à la prédiction théorique. Les patrons de coordination proches de la phase ne sont pas appris plus rapidement que ceux proches de l'anti-phase, ils sont même stabilisés plus lentement que ces derniers. Les progrès sont plus faibles et les erreurs de phase relative plus importantes pour les patrons proches de l'anti-phase que pour les patrons proches de la phase (Wenderoth et al., 2002). Les expérimentations révèlent donc des résultats qui vont complètement à l'inverse de la prédiction théorique : l'attracteur de  $180^\circ$  interfère de façon plus importante avec le patron à apprendre que l'attracteur de  $0^\circ$ . Wenderoth et al. (2002) proposent une explication intéressante sur la divergence entre la théorie et les résultats expérimentaux. Ils soulignent que la perception peut avoir des conséquences importantes dans la stabilisation de relations de phase (Mechsner et al., 2001), et que les patrons proches de  $0^\circ$  sont mieux perçus que ceux proches de  $180^\circ$  (Zaal, Bingham, Schmidt, & Richard, 2000). A partir de ces constats, ils suggèrent que le patron de  $180^\circ$  n'est pas seulement *produit*, mais *perçu* moins précisément que le patron de  $0^\circ$ . Le fait que les modes de coordination proches de  $0^\circ$  soient mieux réalisées que ceux qui sont proches de  $180^\circ$  peut donc être le reflet d'une mauvaise discrimination entre le patron de  $180^\circ$  et les patrons voisins. Le patron de  $0^\circ$  étant perçu de façon plus précise, les participants peuvent plus facilement distinguer et donc produire des patrons proches de cet attracteur.

La deuxième prédiction est testée par Amazeen (2002), Kostrubiec et Zanone (2002) et Wenderoth et al. (2002). Les auteurs font varier la distance  $\Delta$  entre la phase relative à apprendre et l'attracteur intrinsèque le plus proche. Les résultats sur la précision et la stabilité des patrons produits s'accordent assez bien avec le principe de coopération / compétition. Par contre, les observations faites sur la rapidité à apprendre ne suivent pas ce modèle théorique. Amazeen (2002) ne trouve pas de différence à l'acquisition des phases relatives de  $45^\circ$  et de  $90^\circ$ , alors que la plus grande distance de ce deuxième patron par rapport aux patrons intrinsèques laissait présager un apprentissage moindre. Kostrubiec et Zanone (2002) étudient trois phases relatives différentes :  $90^\circ$  ( $\Delta = 90^\circ$ ),  $135^\circ$  ( $\Delta = 45^\circ$ ) et  $158^\circ$  ( $\Delta = 22^\circ$ ). Selon les hypothèses énoncées, la vitesse d'apprentissage, la précision et la stabilité devraient augmenter lorsque  $\Delta$  diminue. Les résultats montrent que les phases relatives de  $90^\circ$  et  $158^\circ$  sont plus rapidement apprises que celle de  $135^\circ$ , ce qui indique que la vitesse avec laquelle les participants apprennent n'est pas directement proportionnel à  $\Delta$ . Par contre, sur l'ensemble de la période d'apprentissage, les patrons les plus proches de l'attracteur en anti-phase,  $135^\circ$  et  $158^\circ$  (petit  $\Delta$ ), sont plus précis que  $90^\circ$  (grand  $\Delta$ ), ce qui indique une compétition plus élevée lorsque la distance du patron à apprendre par rapport au patron intrinsèque est importante. Wenderoth et al. (2002) investiguent l'acquisition de phases relatives éloignées de  $36^\circ$ ,  $60^\circ$  ou  $90^\circ$  par rapport aux attracteurs préexistants. Au tout début de la pratique, les auteurs observent des patrons plus précis lorsque  $\Delta$  est faible (résultat en accord avec la prédiction et avec les résultats de Kostrubiec & Zanone, 2002). Néanmoins, ces différences disparaissent avec la pratique, ce qui montre que le taux d'apprentissage n'est pas proportionnel à  $\Delta$ . L'ensemble de ces résultats mène à deux constats concernant l'influence de la distance  $\Delta$  sur l'exécution et l'apprentissage des patrons de coordination. En accord, avec les prédictions, les patrons proches d'un attracteur intrinsèques sont réalisés de façon plus précises (erreur faible) que les patrons qui sont éloignés. Par contre, la rapidité des sujets à apprendre ne semble pas dépendre de cette distance.

En conclusion, les résultats expérimentaux ne s'accordent pas avec l'hypothèse que la vitesse avec laquelle les sujets apprennent un nouveau mode de coordination dépend de la stabilité de l'attracteur intrinsèque le plus proche ou de sa distance par rapport à ce dernier. Autrement dit, il semble que la facilité à apprendre ne soit pas influencée par la proximité et l'attractivité de l'état stable le plus proche.

### **1.2.2.3.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation des attracteurs initiaux**

Un principe essentiel de l'approche dynamique de l'apprentissage moteur est la modification de l'ensemble de la dynamique intrinsèque avec l'acquisition d'un nouveau mode de coordination ; cette modification mène, de façon implicite, à la déstabilisation d'un des patrons préexistants. Grâce au balayage des relations de phases entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  ou entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ , Zanone et Kelso (1992a, 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) identifient les patrons stables et attracteurs de la dynamique de coordination à différents moments du processus d'apprentissage. Ils observent ainsi une modification du paysage des attracteurs au cours de la pratique, avec l'apparition d'une région attractrice autour du patron de phase à apprendre, et une perte de stabilité du patron en anti-phase. La comparaison entre les balayages effectués juste après la pratique et lors du test de rétention montre que cette modification est conservée après une semaine d'arrêt de la pratique (Zanone & Kelso, 1992a). L'apprentissage mène donc à des changements assez durables de la disposition des attracteurs. Les résultats des différentes expérimentations de Zanone et Kelso suggèrent que le processus d'apprentissage entraîne une stabilisation des états de coordination instables et la déstabilisation des autres, modifiant ainsi la disposition de la dynamique de coordination sous-jacente (Kelso & Zanone, 2002, p. 782). Ainsi, dans le cas de participants initialement bistables,  $0^\circ$  et  $180^\circ$  sont les patrons les plus fréquemment exécutés sur l'ensemble du balayage initial (i.e., quelque soit la phase relative requise). Après apprentissage, le mode de coordination le plus souvent produit correspond à la phase relative requise lors de la période de pratique, et le patron en anti-phase n'est plus exécuté, même lorsqu'il est exigé (Kelso & Zanone, 2002).

Avec une méthodologie différente où seuls les patrons en phase et en anti-phase sont testés en plus de la coordination apprise, Lee et al. (1995), Fontaine et al. (1997) et Swinnen et al. (1997) trouvent des résultats divergents. A partir des résultats obtenus, les différents auteurs concluent que l'apprentissage ne mène pas à une déstabilisation des patrons préférés. Lee et al. (1995) observent une diminution de la précision de l'anti-phase après le premier jour de pratique de  $90^\circ$ . Néanmoins, cet effet est seulement temporaire car le niveau de précision initial est retrouvé à la fin du deuxième jour et conservé lors du troisième et dernier jour de pratique. Fontaine et al. (1997) observent un effet temporaire comparable avec une augmentation de l'erreur sur le patron de  $180^\circ$  entre le début et la fin de chacun des six jours de pratique. Néanmoins, la précision de la coordination en anti-phase revient à son niveau initial au début de chaque jour, et aucune détérioration de performance sur les patrons

intrinsèques n'est observée au cours des jours, y compris lors du test de rétention, quatre semaines après l'arrêt de la pratique. Swinnen et al. (1997) n'observent aucune modification de la phase et de l'anti-phase au cours des trois jours de pratique de 90°. Les résultats de ces trois expérimentations convergent vers la conclusion que la pratique d'un nouveau patron de coordination n'amène pas à une diminution permanente de la précision et de la stabilité des patrons préexistants.

Avec un troisième type de méthodologie, Smethurst et Carson (2001) apportent aussi leur contribution sur la question de la déstabilisation. Ils observent les comportements de transition à partir de la réalisation du patron appris de 90°, sous l'augmentation de la fréquence d'exécution. Ils observent qu'avant la période d'apprentissage, la majorité des transitions se fait en direction du patron intrinsèque en anti-phase. Immédiatement après la pratique, les participants ont plutôt tendance à bifurquer vers une variété de phases relatives autres que 90°, 0° ou 180°. Néanmoins, lors des tests de rétention menés une semaine puis huit semaines après la pratique, les transitions se font de nouveau majoritairement vers l'anti-phase. Les auteurs concluent que leurs résultats ne sont pas en accord avec l'hypothèse qu'apprendre 90° mènerait à la déstabilisation de l'attracteur initial en anti-phase et que leurs observations sont en accord avec celles de Fontaine et al. (1997) et Lee et al. (1995). Ils font l'hypothèse que le patron en anti-phase n'est pas déstabilisé, qu'il peut encore être produit, mais que son attraction est réprimée.

Des résultats inattendus sont obtenus dans la troisième expérimentation menée par Amazeen (2002). L'influence de l'apprentissage sur les patrons intrinsèques est investiguée grâce à une tâche de manipulation de pendules par des mouvements de flexion-extension au niveau des poignets. Les participants ayant appris 45° ou 90° de phase relative lors de l'Expérimentation 2 de l'étude d'Amazeen (2002), sont testés sur 0° et 180° lors de l'expérimentation 3, et comparés à un groupe contrôle (aucun apprentissage). Les résultats montrent que les participants ayant appris 45° ou 90° présentent une précision moins importante (erreur élevée) sur le patron en phase que les participants n'ayant pas appris de nouveau patron de coordination. L'erreur se fait en direction du patron appris. D'autre part, les participants ayant appris 90° réalisent le patron en anti-phase de façon moins variable (faible écart-type de la phase relative) que les deux autres groupes (i.e., apprentissage de 45° et groupe contrôle). Cette expérimentation est la seule à révéler un effet négatif de l'apprentissage sur la précision de l'attracteur en phase et un effet positif sur la stabilité du

patron en anti-phase. Il est important de souligner que les comparaisons s'effectuent entre les groupes, et après apprentissage uniquement. Peut-être le fait de comparer chaque groupe avant et après apprentissage, comme dans les expérimentations présentées ci-dessus, aurait mené à des résultats différents.

Hormis cette dernière expérimentation, les résultats expérimentaux semblent indiquer un effet négatif de la pratique d'un nouveau patron de coordination sur la précision et la stabilité du patron préexistant de  $180^\circ$  juste après la pratique. Plusieurs auteurs revendiquent néanmoins que contrairement aux prédictions théoriques, cette déstabilisation n'est que temporaire (Fontaine et al, 1997 ; Lee et al., 1995), qu'elle n'a pas lieu (Swinnen et al., 1997), ou que l'attraction du mode en anti-phase n'est pas annihilée mais réprimée (Smethurst & Carson, 2001, p. 525).

#### **1.2.2.3.4. Transfert d'apprentissage**

##### - Transfert entre différentes coordinations :

En balayant la dynamique intrinsèque de  $0^\circ$  à  $360^\circ$ , Zanone et Kelso (1997) observent la stabilisation spontanée du patron symétrique au patron appris, alors qu'il n'a pas été pratiqué. Ce résultat est obtenu avec l'apprentissage de différentes valeurs de phase relative : l'apprentissage de  $90^\circ$  se transfère au patron symétrique de  $-90^\circ$  (i.e.,  $270^\circ$ ), et inversement pour l'apprentissage de  $-90^\circ$  ; l'apprentissage de  $135^\circ$  se transfère également au patron symétrique de  $-135^\circ$  (i.e.,  $225^\circ$ ), et inversement pour l'apprentissage de  $-135^\circ$ . Les auteurs suggèrent que ce processus intervient dans le but de préserver la symétrie de la dynamique de coordination et qu'il peut être mis en relation avec le principe d'équivalence temporelle. Selon ce principe d'équivalence temporelle, qui peut être considéré comme l'équivalent temporel de l'équivalence motrice évoqué dans la partie 1.2.1.3.4., le même patron temporel peut être produit quelque soit l'ordre entre les différents composants (Zanone & Kelso, 1997). L'apprentissage d'un patron de coordination serait donc indépendant de l'ordre entre les segments.

Smethurst et Carson (2001) obtiennent des résultats comparables avec l'apprentissage d'une phase relative de  $90^\circ$  entre les mouvements de prono-supination des deux avant-bras. Ils testent les phases relatives de  $90^\circ$ , le patron appris, et de  $270^\circ$ , son symétrique non pratiqué, avant, juste après apprentissage, et après des périodes d'une semaine et de huit semaines d'arrêt de la pratique. Les résultats montrent que sous l'augmentation de la fréquence

d'exécution, le patron de 270° peut être maintenu plus longtemps grâce à la pratique de 90°. Néanmoins, la différence par rapport au pré-test (avant apprentissage) n'atteint un seuil de significativité que lors du test de rétention mené huit semaines après la fin de la pratique. Les auteurs concluent que l'augmentation de la stabilité dynamique du patron de 270° alors que seul 90° a été pratiqué indique un transfert positif de l'apprentissage.

#### - Transfert entre différents systèmes effecteurs

Kelso et Zanone (2002) analysent le transfert de l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination entre deux systèmes effecteurs. Pour cela, les participants apprennent une nouvelle phase relative (45°, 75°, 90°, ou 135°), entre les mouvements de flexion-extension des coudes ou des genoux. L'évolution de la performance de cette coordination sur les deux systèmes effecteurs, pratiqué et non pratiqué, est analysée grâce à un balayage du diagramme de phase de 0° à 180°. Que ce soit dans le cas du transfert des bras vers les jambes, ou des jambes vers les bras, les résultats montrent que la coordination pratiquée avec un système effecteur s'améliore aussi pour le système effecteur non entraîné. Autrement dit, il y a un transfert spontané de l'apprentissage entre les deux systèmes effecteurs. Seules de petites différences peuvent être constatées : le système effecteur non entraîné réalise le nouveau patron de coordination de façon moins stable et moins précise que le système effecteur entraîné.

La première expérimentation d'Amazeen (2002) peut apporter des informations supplémentaires sur le transfert entre différents systèmes effecteurs. La tâche des participants consiste à manipuler des pendules grâce aux mouvements de flexion-extension des poignets. La variation de la longueur et de la masse des pendules permet de produire des différences de fréquences propres ( $\Delta\omega$ ) variées entre les deux pendules. On peut donc considérer que la tâche est réalisée avec des effecteurs différents. Les participants apprennent une phase relative de 90° entre deux pendules ayant une différence de fréquence propre nulle ( $\Delta\omega = 0 \text{ rad.s}^{-1}$ ), ou différente ( $\Delta\omega = -1 \text{ rad.s}^{-1}$ ). Ils réalisent le patron exigé à une fréquence de mouvement qui leur est confortable. La phase relative apprise est ensuite testée avec 5 paires de pendules ( $\Delta\omega = -2 ; -1 ; 0 ; 1 ; 2 \text{ rad.s}^{-1}$ ) et pour deux fréquences de mouvement différentes (80% ou 134% de la fréquence propre préférée des pendules). Malgré le fait que la coordination de 90° n'ait été pratiquée qu'avec une seule une paire de pendules et avec un ensemble de fréquences limité, les participants sont capables de produire ce patron avec différents effecteurs et à deux

fréquences différentes. L'apprentissage s'est donc transféré à de nouveaux systèmes effecteurs et à de nouvelles conditions de fréquence d'exécution. Notons que ce dernier résultat (transfert de la coordination apprise vers de nouvelles fréquences d'exécution) renvoie au paragraphe ci-dessous, à savoir le transfert entre différentes conditions de réalisation.

- Transfert entre différentes conditions de réalisation :

La moitié des études présentées dans le tableau examinent la réalisation du patron appris dans de nouvelles conditions. Par exemple, Amazeen (2002, voir ci-dessus), et Lee et al. (1995) analysent la performance de la phase relative à apprendre dans différentes conditions de fréquence d'exécution. Avec une tâche de flexion-extension des coudes, Lee et al. (1995) étudient le transfert de la phase relative de 90°, pratiquée à une fréquence de 1 Hz, à une condition d'augmentation progressive de la fréquence d'exécution de 1 à 1.53 Hz en 9 paliers. Les résultats montrent que l'apprentissage de 90° dans une condition de fréquence unique permet l'amélioration de la performance de ce patron dans la condition d'augmentation de fréquence. Bien que le patron produit dans la condition de transfert soit moins précis et stable que pour la tâche d'apprentissage, son taux d'amélioration est comparable dans les deux conditions.

La variation des conditions de feedback constitue un autre type de transfert étudié. Toujours avec une tâche de flexion-extension des coudes, Swinnen et al. (1997) analysent l'apprentissage et le transfert de la phase relative de 90° dans différentes conditions de feedback. Trois groupes de participants apprennent la nouvelle coordination les yeux bandés (feedback réduit), avec vision (feedback normal), ou avec présence d'une figure de Lissajous informant le participant sur la conséquence de ses mouvements (feedback augmenté). Les trois groupes sont testés dans ces trois conditions de transfert, avant, au milieu et à la fin de chacun des trois jours de pratique. Les résultats montrent que quelque soit la condition de feedback lors de la session d'apprentissage, la précision et la stabilité du patron de 90° s'améliorent avec la pratique dans les trois conditions de transfert. La performance n'est pas meilleure lorsque le patron est réalisé dans la condition de pratique, ce qui indique que l'apprentissage du nouveau patron de coordination se transfère aux différentes conditions de feedback testées. Notons que la pratique avec feedback augmenté (figure de Lissajous) permet la meilleure performance et le meilleur transfert du patron de 90°.



Wenderoth et al. (2002) étudient également le transfert d'apprentissage entre différentes conditions de feedback. Cinq groupes de participants apprennent une phase relative située à différentes distances des patrons intrinsèques. Chaque essai de pratique est composé de deux conditions de feedback. Dans un premier temps, les participants disposent d'une figure de Lissajous sur laquelle sont affichés deux curseurs. Le premier correspond au modèle à suivre, qui se déplace sur une figure de Lissajous invisible, et le deuxième indique la position relative actuelle entre les deux membres du sujet (voir la Figure 1.10.). Dans un deuxième temps, ce feedback augmenté est supprimé, et les participants doivent maintenir la coordination exigée avec une vision normale des bras. Aucune connaissance du résultat n'est fournie durant cette deuxième partie de l'essai. Les résultats montrent qu'avec la pratique, la précision et la stabilité des patrons appris ne s'améliorent pas seulement dans la condition de feedback augmenté, mais aussi dans la condition de feedback normal. A la fin de la pratique, la performance reste néanmoins meilleure dans la condition de feedback augmenté, comme pour Swinnen et al. (1997). Les auteurs concluent qu'un certain transfert intra-tâche a eu lieu et soulignent que l'amélioration de la performance avec et sans feedback augmenté indique que les participants n'apprennent pas seulement une tâche de poursuite de cible mais construisent réellement une représentation interne du mouvement requis (Wenderoth et al., 2002, p. 178 et 168). En conclusion, l'ensemble des résultats expérimentaux est en faveur d'un transfert positif de l'apprentissage entre différentes conditions de fréquence d'exécution et de feedback.

#### **1.2.2.4. Bilan et discussion**

Pour la plupart des questions abordées, les résultats expérimentaux concordent. La confrontation des différentes observations obtenues sur une même question mène à plusieurs conclusions :

(i) Lors de l'apprentissage d'une nouvelle coordination bi-manuelle, le patron produit est tout d'abord attiré vers les tendances de coordination préférées du système, à savoir la phase et en l'anti-phase. Avec la pratique, l'erreur de la phase relative produite par rapport à la phase relative exigée diminue, de même que la variabilité. L'amélioration de la précision et de la stabilité permet d'atteindre le mouvement coordonné requis.

(ii) Contrairement aux prédictions théoriques, la vitesse avec laquelle les participants apprennent la nouvelle coordination ne dépend pas de la stabilité ou de la proximité du patron intrinsèque le plus proche de la phase relative à apprendre.

(iii) La phase relative apprise semble comporter un certain niveau d'abstraction car elle peut être produite dans des conditions différentes de celles de la pratique. Elle peut être réalisée par des systèmes effecteurs non entraînés, dans des conditions de feedback ou de fréquence de mouvement différentes, et indépendamment de l'ordre entre les segments coordonnés.

Le principal point de désaccord entre les auteurs concerne la déstabilisation des attracteurs préexistants en conséquence de la pratique d'un nouveau mode de coordination. A la suite de l'apprentissage, Zanone et Kelso (1992a, 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) observent une perte de stabilité du mode en anti-phase de façon répétée. D'après les autres études menées, le patron en anti-phase peut être temporairement réprimé, mais pas déstabilisé de façon permanente par l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination (e.g., Fontaine et al., 1997 ; Lee et al, 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Swinnen et al., 1997). Ces études s'opposent à la conclusion de Zanone et Kelso, et tentent d'expliquer les divergences de résultats.

Lee et al. (1995) soulignent que la phase relative à produire est spécifiée différemment selon les études. Dans la tâche utilisée par Zanone et Kelso, des métronomes visuels guident le mouvement de chaque doigt, alors que pour Lee et al. (1995), l'information comportementale correspond au feedback augmenté sous la forme d'une figure de Lissajous. Dans le premier cas, les participants apprennent à faire correspondre le mouvement de leurs doigts à l'information externe, alors que dans le deuxième, l'information ne spécifie pas quoi faire, mais plutôt ce qui doit être produit (Lee et al., 1995, p. 273). Ces différences méthodologiques peuvent expliquer les divergences de résultats sur la déstabilisation de l'anti-phase (voir aussi Lee, 2004, pour une discussion sur le rôle de l'intention). Lee et al. (1995) évoquent également les segments impliqués (doigts vs. avant-bras) et la quantité de pratique comme responsables possibles des divergences. Swinnen et al. (1997) proposent d'autre part, que les différences de résultats sur la déstabilisation sont dues à des différences méthodologiques telles que la tâche utilisée, le nombre de patrons testés, ou la nature continue vs. discrète de la méthode de balayage.

Un autre type de différence méthodologique est soulevé par Fontaine et al. (1997) et Smethurst et Carson (2001). Zanone et Kelso utilisent la méthode du balayage de la disposition des attracteurs par palier de 15° alors que les autres études testent uniquement les

phases relatives de 0° et 180°. Fontaine et al. (1997) suggèrent que le fait de toujours débiter le balayage par le patron en phase et de terminer par l'anti-phase peut jouer sur la déstabilisation observée sur ce dernier patron : le fait d'augmenter ou de diminuer progressivement la phase relative requise pourrait créer une tendance à rester sur le patron actuellement produit lorsque l'on passe au palier de phase relative suivant. Peut-être que des effets opposés comme la déstabilisation du patron en phase auraient été observés si le balayage avait été mené dans l'autre sens. Si ces observations peuvent être justifiées pour les études de Zanone et Kelso (1992a, 1997), elles ne le sont plus pour Kelso et Zanone (2002). Dans cette dernière expérimentation, les différentes étapes du balayage sont proposées de façon randomisée, ce qui exclue un effet possible de l'ordre de présentation des patrons sur les déstabilisations observées.

Smethurst et Carson (2001) précisent que la méthode de balayage implique que le participant passe constamment d'un patron de phase relative à l'autre. Chaque mode de coordination doit donc être produit puis annihilé, ce qui implique de réduire la stabilité du patron actuel de façon à pouvoir passer au suivant (Smethurst & Carson, 2001). Cette tâche est qualitativement différente des essais de pratique, pendant lesquels le patron de coordination à apprendre doit être maintenu. Contrairement aux études qui n'utilisent pas la méthode de balayage, les essais de pratique et de test n'ont donc pas les mêmes exigences. Selon Smethurst et Carson (2001), il est possible que les participants des expérimentations de Zanone et Kelso deviennent capable de déstabiliser volontairement les patrons en phase et en anti-phase afin de faciliter des transitions plus "douces" vers la phase relative exigée suivante (Smethurst et Carson, 2001, p. 526).

Concernant la divergence de résultats sur la déstabilisation des modes intrinsèques, il est également important de souligner que seuls Zanone & Kelso (1992a) analysent les résultats des participants de façon individuelle. Ils repèrent ainsi des comportements fondamentalement différents, que ce soit avant ou après la session d'apprentissage. Cette méthode permet notamment de mettre en évidence que la "perte partielle de stabilité du patron en anti-phase" identifiée lors de l'analyse du groupe de participants (Zanone et Kelso, 1992a, p. 410) n'est pas une réalité individuelle pour chaque sujet. Les déstabilisations les plus explicites sont ainsi observées lors des analyses individuelles, qui révèlent souvent des comportements différenciés, voire opposés (Zanone et Kelso 1992a, 1997 ; Kelso & Zanone,

2002). Peut-être que certains effets individuels ont été masqués dans les analyses par groupe pour les autres études.

Notre travail a pour but d'envisager ces questions et divergences sous angle nouveau : celui des coordinations posturales. Le système postural satisfait la condition primordiale pour étudier l'apprentissage moteur selon une approche dynamique, à savoir, la connaissance de sa dynamique intrinsèque (voir les travaux de Bardy et ses collaborateurs dans le chapitre suivant). Cette connaissance en fait un système effecteur propice et original pour étudier l'apprentissage sous de nouvelles modalités. Avant de nous plonger de nouveau dans la compréhension de l'apprentissage moteur, faisons un détour par l'étude des coordinations posturales, qui seront notre outil d'étude des mécanismes d'acquisition d'un nouveau mode de coordination.

### **1.3. Les Coordinations Posturales**

La posture constitue un domaine d'étude particulier dans le champ du contrôle moteur. En effet, la majorité des travaux portant sur la posture ne concernent pas la coordination inter-segmentaire mais la stabilité posturale. Les déplacements du centre de masse, du centre de pression ou de la tête sont étudiés sans que la façon dont les segments se coordonnent soit analysée. Nous nous intéressons ici, au contraire, à la façon dont le système postural s'organise pour réaliser différentes tâches motrices tout en restant en équilibre debout. Notons que contrairement à de nombreuses études sur la coordination inter-segmentaire, les coordinations posturales sont étudiées à partir de tâches dont le but est différent de la coordination elle-même. Ces tâches sont appelées *supra-posturales* car leur but n'est pas de produire un patron de coordination postural particulier (i.e., absence de paramètre spécifique). Nous présentons ici deux séries d'expérimentations qui ont analysé la coordination inter-segmentaire adoptée pour atteindre des buts fonctionnels lors la position bipède debout. Cette présentation est loin d'être exhaustive sur ce sujet, et nous renvoyons le lecteur aux travaux de Buchanan et Horak (1999, 2001, 2003) ainsi que Ko et collaborateurs (Ko, Challis, & Newell, 2001, 2003 ; Ko, Challis, Stitt, & Newell, 2003) pour compléter la revue de littérature sur la coordination inter-segmentaire lors de la posture érigée.

### 1.3.1. Les stratégies neuromusculaires

Lorsque l'on parle de coordinations posturales, beaucoup d'auteurs font référence aux travaux de Nashner et ses collaborateurs (e.g., Horak & Nashner, 1986 ; Nashner, 1976 ; Nashner & McCollum, 1985 ; Nashner, Shupert, Horak, & Black, 1989). Ces auteurs ont suggéré qu'un nombre limité de stratégies posturales était utilisé afin de conserver l'équilibre, parmi l'ensemble des combinaisons possibles. Ils considèrent que les coordinations observables au niveau segmentaire ou articulaire sont la conséquence des coordinations musculaires, elles même provoquées par l'organisation de la commande centrale.

Dans les expérimentations menées par Nashner et al., les participants se tiennent debout sur une plateforme qui peut être translatée sur un axe antéropostérieur. Cette plateforme permet de produire une perturbation externe discrète qui appelle une réaction posturale du participant afin de maintenir l'équilibre. Un déplacement de la plateforme vers l'avant provoque une inclinaison du corps vers l'arrière et inversement pour un déplacement arrière. Les données en provenance de l'électromyographie et d'une plateforme de force sont analysées. Deux types de mouvement d'oscillation du corps sont constatés de façon stéréotypée chez tous les participants. Ils se distinguent par l'organisation temporelle des différentes activations musculaires. Pour le premier type de mouvement, le déplacement de la plateforme induit une activité musculaire qui débute au niveau de la cheville (activation musculaire distale, proche de la source de perturbation) avant de se développer au niveau des cuisses et du tronc (activation musculaire proximale). Les muscles sont activés sur le côté controlatéral à la direction de déplacement du centre de gravité provoqué par la perturbation. Ce patron est appelé *stratégie cheville* parce qu'il restaure l'équilibre en bougeant le corps principalement autour de l'articulation des chevilles. Cette stratégie est observée pour des perturbations de basse fréquence, de faible amplitude (McCollum & Leen, 1989 ; Nashner et al., 1989), ou pour une large surface de support (Horak & Nashner, 1986).

Lorsque les paramètres de fréquence ou d'amplitude sont augmentés et que la taille de la surface de support est réduite, la rotation au niveau des chevilles n'est plus suffisante pour contrebalancer la perturbation externe. Cette situation a pour conséquence une activation des muscles des cuisses et du tronc en premier lieu (activation musculaire proximale) avant d'impliquer les muscles distaux. Les muscles activés sont les muscles antagonistes à ceux utilisés dans la stratégie cheville : l'activité musculaire se situe du côté ipsilatéral à la

direction de déplacement du centre de gravité provoqué par la perturbation. Ce patron est appelé *stratégie hanche* parce que le mouvement est observé principalement autour de l'articulation des hanches. Pour des surfaces de support de taille intermédiaire, Horak et Nashner (1986) observent des mouvements posturaux plus complexes qui ressemblent à une combinaison des stratégies hanches et chevilles. Ces mouvements sont appelés *stratégies mixtes* et concernent toutes les stratégies qui ne correspondent pas rigoureusement à une stratégie cheville ou hanche.

Les oscillations posturales constatées lors de la position debout ont été modélisées par un pendule inversé simple lorsqu'elles sont inférieures à 0.5 Hz (McCollum & Leen, 1989). Pour osciller à des fréquences plus importantes, le corps doit être scindé au niveau des hanches, le tronc et la tête n'oscillant pas en phase avec les jambes (McCollum & Leen, 1989). La fréquence de 0.5 Hz est donc une contrainte mécanique limite à la production de patrons posturaux spécifiques (Nashner et al., 1989). En plus des contraintes biomécaniques, l'importance du rôle des contraintes somato-sensorielles et vestibulaires sur la sélection des stratégies posturales a été soulignée (Horak, Nashner, & Diener, 1990 ; McCollum & Leen, 1989).

Soutenant une approche prescriptive des coordinations posturales, Nashner et McCollum (1985) proposent que les stratégies hanches et chevilles correspondent à des patrons (musculaire ou cinématique) sélectionnés par le système nerveux central de façon à ce qu'ils soient approprié au contexte environnemental. Parmi l'ensemble des patrons posturaux possibles pour maintenir l'équilibre debout, l'individu dispose donc d'un nombre limité de stratégies posturales qui sont inscrites dans son répertoire de mécanismes de régulation sous forme de programmes moteurs centraux. Le passage d'une stratégie neuromusculaire à une autre se ferait de façon progressive en passant par des stratégies mixtes, correspondant à un nombre limité de combinaisons entre la stratégie hanche et la stratégie cheville (Nashner & McCollum, 1985). Les études sur les coordinations posturales développées par Bardy et ses collaborateurs dans le cadre d'une approche dynamique du contrôle moteur, s'opposent aux conclusions de Nashner et McCollum (1985) concernant la prescription du mode de coordination postural par le système nerveux central, ainsi que certaines de leurs analyses expérimentales.

### 1.3.2. Approche dynamique des coordinations posturales

La définition des stratégies neuromusculaires développée par Nashner et ses collaborateurs se base sur l'analyse de l'activité musculaire et suppose que ce niveau d'analyse est équivalent à celui de la cinématique des segments et de la programmation motrice. Or, la relation entre ces différents niveaux n'est pas univoque (Bernstein, 1967 ; Turvey et al., 1978, 1982). Une même activité musculaire peut avoir des conséquences différentes sur le mouvement des segments en fonction de la position initiale des membres, des conditions de réalisation, ou de l'activité des autres groupes musculaires. Ce niveau d'analyse ne semble donc pas être le plus approprié pour analyser le mouvement proprement dit. Un autre problème soulevé par l'approche de Nashner et collaborateurs concerne la présomption qu'il n'y a pas de rotation autour des hanches lors de la stratégie cheville. Nashner et McCollum (1985, p.140) soulignent pourtant que la stratégie cheville correspond principalement et pas exclusivement à une rotation autour des chevilles, et leurs résultats expérimentaux (Nashner & McCollum, 1985, Figure 5a, p. 141) démontrent effectivement la présence de mouvement au niveau des hanches (Oullier, Marin, Bootsma, Stoffregen, & Bardy, 2004).

Bardy et ses collaborateurs (voir Bardy, 2004 pour une revue) parent à ces problèmes en analysant les coordinations posturales grâce à l'évolution relative des positions angulaires des articulations des hanches et des chevilles. Ils utilisent la variable macroscopique de la coordination inter-segmentaire identifiée comme pertinente par l'approche dynamique du contrôle moteur, à savoir, la phase relative. Leur approche diffère fondamentalement de celle de Nashner et collaborateurs : les états posturaux et leurs changements ne sont pas le résultat d'une prescription de la part du système nerveux central, mais résultent d'un processus d'auto-organisation. Dans cette perspective dynamique, différents types de contraintes, et leurs interactions, contribuent à l'émergence de patrons posturaux particuliers (e.g., Riccio & Stoffregen, 1988). La tâche supra-posturale utilisée par Bardy et ses collaborateurs n'est plus de conserver l'équilibre lors de la perturbation discrète de la surface de support, mais d'osciller d'avant en arrière de façon cyclique afin de suivre de la tête les mouvements antéropostérieurs d'une cible (Figure 1.11.). Ces mouvements antéropostérieurs de la tête sont réalisés à partir de mouvements au niveau des hanches et des chevilles, sans aucune instruction sur la façon de bouger et de coordonner ces deux articulations. Les positions angulaires sont enregistrées par des électro-goniomètres placés au niveau de l'articulation de la hanche et de l'articulation de la cheville.

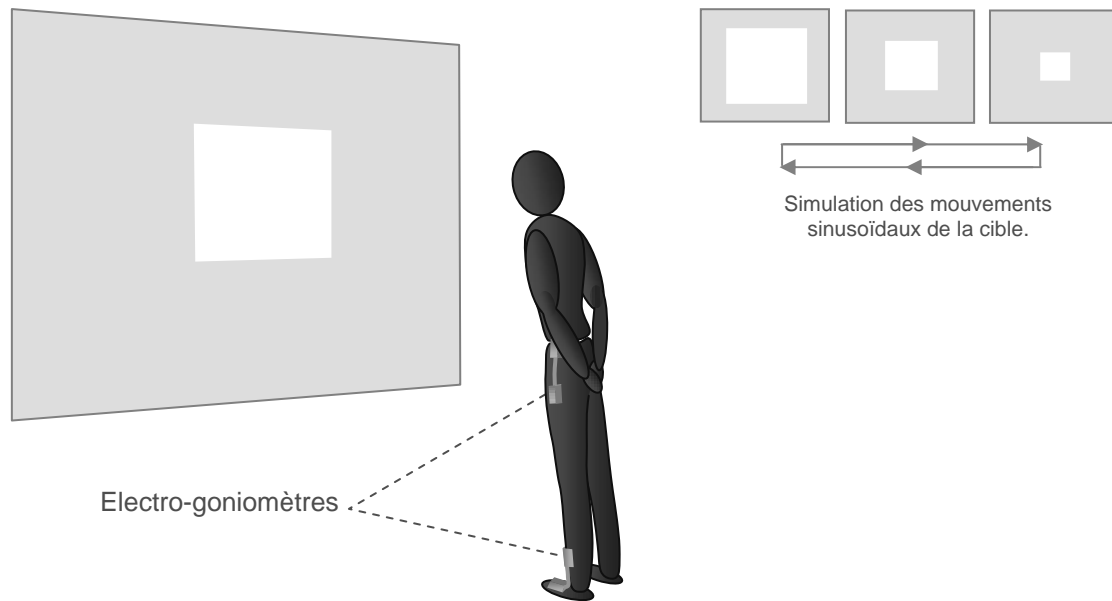


Figure 1.11. Dispositif des expérimentations de Bardy et al. sur les coordinations posturales. Sur l'écran, une cible (carré blanc) s'agrandit et rétrécit de façon à simuler son déplacement sur un axe antéropostérieur sous forme d'aller et retour. Le participant, debout face à cet écran, a pour instruction de garder une distance constante entre sa tête et le carré (i.e., la tête doit reculer lors de l'expansion de la cible et inversement). Cette tâche peut être réalisée grâce à des mouvements au niveau des hanches et des chevilles, les participants ayant pour consigne de ne pas bouger le cou et les genoux.

### 1.3.2.1. Emergence des coordinations posturales et système de contraintes

Lors de quatre études expérimentales (Bardy, Marin, Stoffregen, & Bootsma, 1999 ; Marin, Bardy, Baumberger, Flückiger, & Stoffregen, 1999 ; Marin, Bardy, & Bootsma, 1999 ; Oullier, Bardy, Stoffregen, & Bootsma, 2002), Bardy et ses collaborateurs se sont centrés sur l'émergence des modes de coordination posturaux qui sous-tendent la réalisation de la tâche supra-posturale dans différentes conditions de contraintes.

Bardy et al. (1999) manipulent d'une part, deux types de contraintes mécaniques relatives aux propriétés de l'organisme (contraintes intrinsèques), la hauteur du centre de masse par rapport au sol et la longueur effective des pieds, et d'autre part, une contrainte



environnementale, à savoir, l'amplitude des mouvements de la cible (et donc, implicitement, de la tête du participant). Dans la première expérimentation, la hauteur du centre de masse est variée en lestant les participants avec un poids de 10 kg placé, soit à hauteur des genoux, soit à hauteur du cou. Les trois conditions de hauteur du centre de masse ainsi obtenues (normale, basse et haute) sont couplées à 4 conditions d'amplitude de cible (5, 14, 18 et 35 cm pic à pic). Dans la deuxième expérimentation, la longueur des pieds des participants est artificiellement modifiée en plaçant les sujets sur une poutre de 10 cm de large ou au contraire en fixant les pieds sur des skis tout en laissant libre l'articulation de la cheville. Cette fois encore, les trois conditions de longueur de pieds (normaux, petits ou grands) sont couplées aux quatre conditions d'amplitude de cible (5, 14, 18 et 35 cm pic à pic). Pour les deux expérimentations, la fréquence d'oscillation de la cible est fixée à 0.2 Hz.

Les résultats montrent que quelque soient les combinaisons des différents types de contraintes, les coordinations posturales convergent vers seulement deux modes de phase relative hanche-cheville (voir la Figure 1.12.) : un mode proche de la phase ( $\phi_{rel} \approx 20^\circ$ ) pour lequel les deux articulations bougent dans la même direction de façon quasi synchrone, et un mode en anti-phase ( $\phi_{rel} \approx 180^\circ$ ), pour lequel les articulations bougent simultanément dans des directions opposées. Des mouvements de flexion-extension sont en effet constamment présents au niveau des deux articulations ; la coordination posturale ne correspond donc pas à un mouvement mono-articulaire. Le mode en phase émerge de façon préférentielle pour de faibles amplitudes de cible, alors que le mode en anti-phase est principalement observé pour les amplitudes de cible les plus hautes. L'amplitude semble donc être un paramètre de contrôle qui influence l'émergence du patron de coordination postural.

La variation des contraintes relatives aux propriétés du corps mène à l'émergence de l'un ou l'autre mode de coordination en fonction de l'amplitude de la cible (Figure 1.13.). La valeur de l'amplitude "seuil", pour laquelle est observée le passage du mode en phase au mode en anti-phase, dépend de la condition de contrainte corporelle. La définition d'une seule contrainte n'est donc pas suffisante pour prédire le mode de coordination qui sera adopté par le système. Cette étude montre que les coordinations posturales émergent à partir de l'influence d'une variété de contraintes qualitativement différentes.

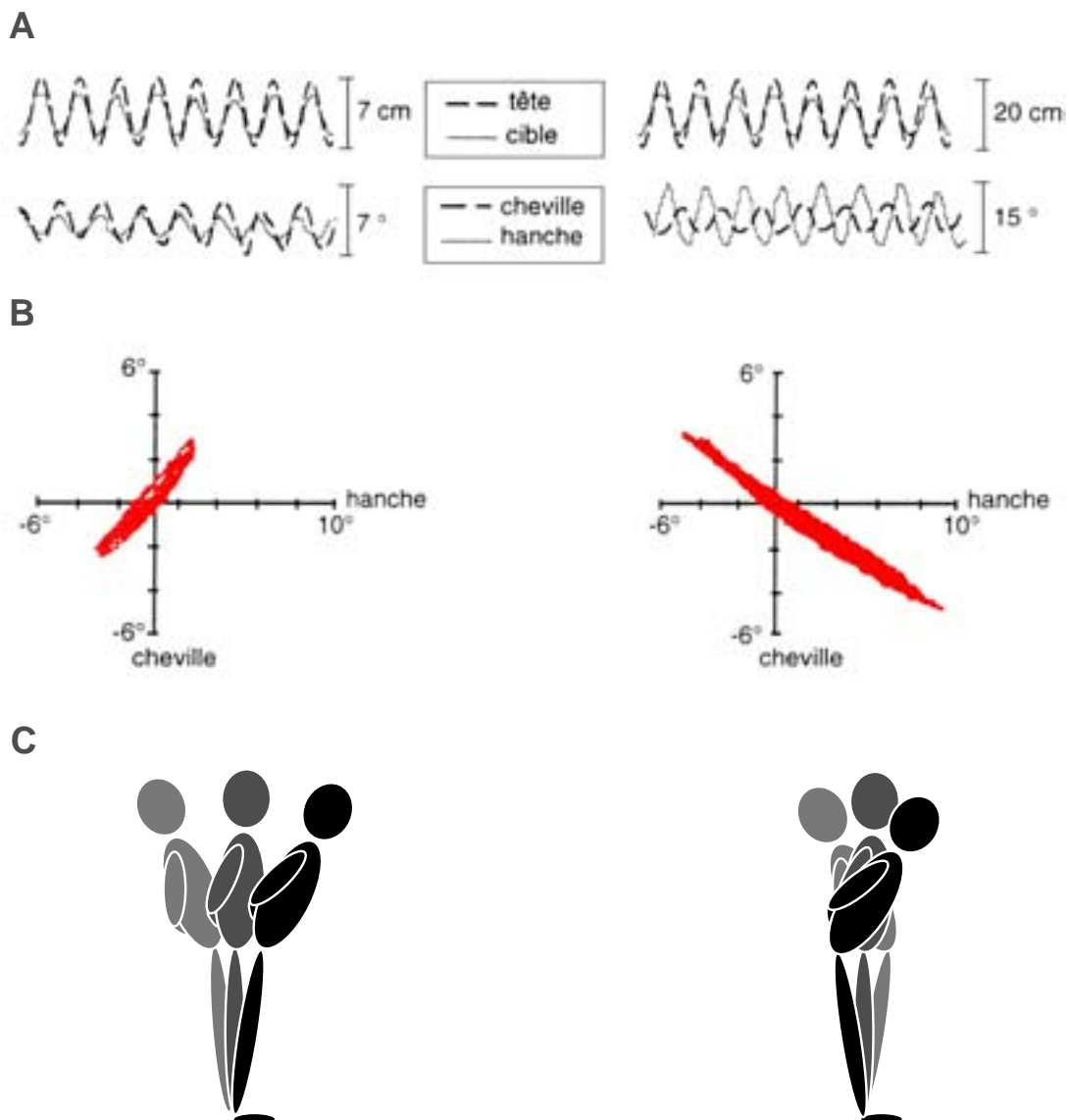


Figure 1.12. Analyse de deux essais représentatifs d'un participant de l'expérimentation de Bardy et al. (1999) pour une condition de position haute du centre de masse. A gauche, pour une amplitude d'oscillation de la cible de 5 cm, le participant adopte une coordination hanche-cheville en phase. A droite, pour une amplitude d'oscillation de la cible de 18 cm, une coordination hanche-cheville en anti-phase est produite. A, partie supérieure : position de la tête et de la cible (position virtuelle) en fonction du temps. A, partie inférieure : position angulaire des hanches et des chevilles en fonction du temps. B : espace hanche-cheville (i.e., figure de Lissajous) dans les deux conditions. C : représentation schématique des mouvements du participant pour les deux coordinations.

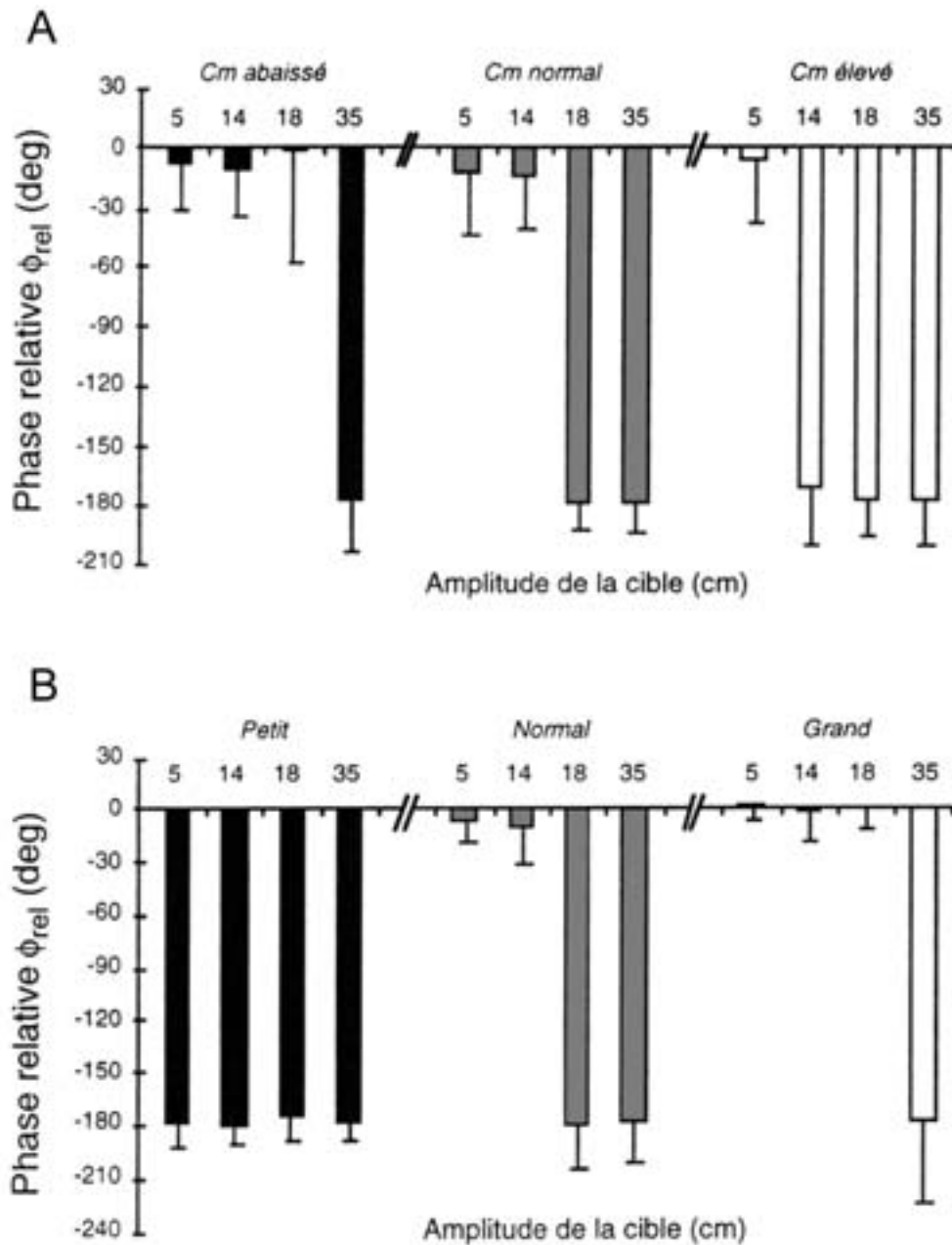


Figure 1.13. Moyennes et écarts-types de la phase relative hanche-cheville du groupe de participants des expérimentations de Bardy et al. (1999), pour lesquelles 4 amplitudes d'oscillation de la cible ont été testées (5, 14, 18 et 35 cm), ainsi que (A) 3 conditions de hauteur du centre de masse (Expérimentation 1), et (B) 3 conditions de longueur des pieds (Expérimentation 2).

Dans une deuxième étude (Marin et al., 1999a), ce sont les contraintes relatives à la surface de support qui sont manipulées. La tâche de suivi de cible est réalisée sur trois

surfaces différentes. La première est un sol standard (surface rigide et rugueuse), pour la deuxième, les participants chaussent des patins à roulettes (surface rigide et mouvante), et pour la troisième, ils se tiennent sur un épais tapis de gymnastique (surface déformable mais rugueuse). La cible se déplace selon trois conditions d'amplitude (14, 33 et 83 cm), à une fréquence toujours égale à 0.2 Hz. Comme dans l'étude précédente, le patron de coordination émergent dépend des conditions de contraintes. Sur les patins, le patron hanche-cheville en phase est réalisé quelque soit l'amplitude de la cible. Sur le tapis de gymnastique, au contraire, c'est le patron en anti-phase qui est réalisé indépendamment de l'amplitude de cible. Sur le sol classique, le mode de coordination en anti-phase est adopté à partir de l'amplitude de 33 cm.

Dans l'expérimentation menée par Marin et al. (1999b), l'émergence des coordinations hanche-cheville est investiguée chez un groupe de participants sédentaires et un groupe de gymnastes experts. L'expertise sportive peut en effet être considérée comme une contrainte intrinsèque au même titre que la taille des pieds ou la hauteur du centre de masse, étudiées par Bardy et al. (1999). Cette fois, ce n'est pas l'amplitude de la cible qui est variée, mais sa fréquence d'oscillation, afin d'observer si elle aussi, agit comme paramètre de contrôle sur la phase relative produite. Les résultats montrent que c'est effectivement le cas, et que l'apparition du mode en anti-phase à la place du mode en phase, a lieu pour des valeurs seuil de fréquence plus faibles chez les sédentaires que chez les gymnastes. Il est supposé que ce changement retardé est dû au développement d'une raideur corporelle plus importante chez les gymnastes afin de répondre aux demandes particulières de leur pratique sportive, comme le maintien de l'équilibre sur la poutre.

Dans toutes les expérimentations décrites ici, même si aucune instruction ne spécifie le mode de coordination postural à produire et que celui-ci émerge spontanément, le but de la tâche est toujours de suivre de la tête les mouvements antéropostérieurs de la cible. Oullier et al. (2002) se demandent quelles seraient les conséquences sur les patrons posturaux si l'intention des participants n'était plus de suivre mais simplement de regarder les mouvements de la cible. Dans cette expérimentation, les participants sont debout dans une chambre mobile qui permet le déplacement de l'ensemble de leur scène visuelle. Le mouvement appliqué à la chambre mobile suit le même principe que les mouvements virtuels de la cible précédemment utilisés, c'est-à-dire un mouvement sinusoïdal, antéropostérieur par rapport au sujet. Les participants sont testés dans deux conditions d'instruction : on leur demande soit de regarder, soit de suivre de la tête les mouvements de la cible (cette fois, réels) placée sur le mur en face

d'eux (voir aussi Oullier, Bardy, Stoffregen, & Bootsma, 2004 pour un protocole proche incluant la contrainte supplémentaire d'être en équilibre sur une poutre). Une fois de plus, aucune instruction n'est donnée sur la coordination posturale à adopter. L'amplitude des mouvements de la chambre mobile est fixée à 4 cm et sa fréquence est augmentée ou diminuée par paliers de 0.05 Hz entre 0.10 Hz et 0.75 Hz. Les résultats montrent que les seuls patrons posturaux observés correspondent à des phases relatives proches de 20° ou de 180° pour les deux types de tâches, et que lors de la variation du paramètre de contrôle (i.e., la fréquence de la cible), une transition entre ces deux modes est observée, sans mode de coordination intermédiaire. Ces observations suggèrent une dynamique de coordination commune pour les deux types de tâche (regarder vs. suivre). Les transitions posturales et leur nature auto-organisée sont étudiées de façon plus approfondie dans l'étude que nous présentons ci-après.

### **1.3.2.2. Les transitions posturales**

A la suite de ces travaux, Bardy, Oullier, Bootsma, et Stoffregen (2002) cherchent à prouver que les transitions entre les modes de coordination ne sont pas la conséquence comportementale d'un changement de programme moteur au niveau du système nerveux central (e.g., Nashner & McCollum, 1985), mais résultent de la nature auto-organisée du système postural. Pour cela, ils s'intéressent à l'évolution des patrons posturaux sous l'influence de la variation d'un paramètre de contrôle identifié précédemment (e.g., Marin et al., 1999b), à savoir, la fréquence d'exécution. Cette méthode - utilisée pour la première fois par Kelso (1981, 1984) avec le système bi-manuel (voir la partie 1.1.8.) – permet d'atteindre les points critiques de transition de la dynamique de coordination, auprès desquels les processus qui dirigent la stabilité du patron, sa flexibilité, et même sa sélection peuvent être découverts (Kelso, 1994b ; Kelso et al., 1992). Les auteurs partent du principe suivant : si les changements entre les modes de coordination posturaux en phase et en anti-phase (e.g., Bardy et al., 1999) sont autonomes, auto-organisés, alors, ils doivent révéler les signatures propres aux transitions de phase des systèmes dynamiques. Autrement dit, les phénomènes suivants devraient accompagner le changement continu du paramètre de contrôle (Kelso, 1995 ; Turvey, 1990): (i) la présence d'au moins deux attracteurs correspondant à des valeurs spécifiques de la variable collective ; (ii) la présence d'une bifurcation d'un état attracteur à l'autre, sous l'effet de l'augmentation (ou de la diminution) de la valeur du paramètre de contrôle – ce changement d'état s'effectue de façon directe, sans passer par des modes de coordination intermédiaires ; (iii) l'augmentation de la variabilité de la variable collective aux

abords de la transition – ce phénomène appelé "fluctuations critiques" traduit une perte progressive de stabilité de l'attracteur ; (iv) le "ralentissement critique" qui traduit également la perte de stabilité des attracteurs – ce ralentissement correspond à une augmentation du temps de relaxation, c'est à dire le temps mis par le système pour rejoindre l'état attractif après une perturbation externe ; (v) la présence d'hystérésis, par lequel le système tend à rester dans son bassin d'attraction lorsque le paramètre de contrôle évolue à travers la région de transition – ceci se traduit par le fait que les valeurs de transition sont différentes en fonction de la direction dans laquelle le paramètre de contrôle varie.

Dans deux expérimentations impliquant une tâche de poursuite visuelle, Bardy et al. (2002) cherchent à identifier ces signatures lors du contrôle multi-segmentaire de la posture. La tâche utilisée correspond toujours à la tâche de suivi de cible (Figure 1.11.). Pour l'expérimentation 1, l'amplitude de la cible est fixée à 10 cm et la fréquence de la cible est augmentée ou diminuée de façon continue par paliers de 0.05 Hz entre 0.05 Hz et 0.80 Hz. Pour l'expérimentation 2, une perturbation visuelle soudaine est appliquée au niveau du mouvement de la cible, à des moments plus ou moins éloignés de la région de transition. Cette perturbation correspond à une variation directe d'un demi cycle au niveau du mouvement oscillatoire de la cible (inversion du mouvement de la cible). Les résultats montrent une préférence manifeste pour un mode de coordination proche de la phase lors de basses fréquences de cible. Lorsque la fréquence devient plus importante, le système bifurque vers un mode de coordination en anti-phase pour une valeur donnée du paramètre de contrôle. Le phénomène inverse est constaté lorsque la fréquence de mouvement est diminuée : on observe une transition d'un mode hanche-cheville en anti-phase vers un mode en phase. La Figure 1.14. met en évidence la présence d'un phénomène d'hystérésis, c'est-à-dire un décalage du seuil de fréquence pour lequel la transition entre les deux états de coordination a lieu, en fonction de la condition d'augmentation vs. diminution du paramètre de contrôle. Les différentes analyses fournissent la preuve que les changements de coordination posturaux suivent le comportement typique des transitions de phase non-équilibrées (i.e., des transitions qui résultent d'une perte de stabilité), exposant multi-stabilité, bifurcation, fluctuations critiques, hystérésis (Expérimentation 1, voir la Figure 1.15.) et ralentissement critique (Expérimentation 2). Ces résultats suggèrent que la posture est organisée en terme de phénomènes dynamiques, et qu'elle se caractérise par des modes de coordination préférés qui émergent de contraintes variées en interaction, plutôt qu'en terme de patrons d'activation musculaires stockés au niveau neural (Bardy et al., 2002).

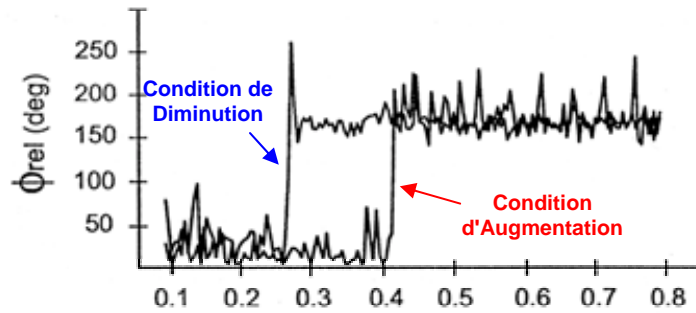


Figure 1.14. Essai représentatif d'un participant de l'expérimentation de Bardy et al. (2002). La phase relative produite est représentée en fonction de la fréquence d'oscillation de la cible dans les conditions d'augmentation et de diminution de cette fréquence.

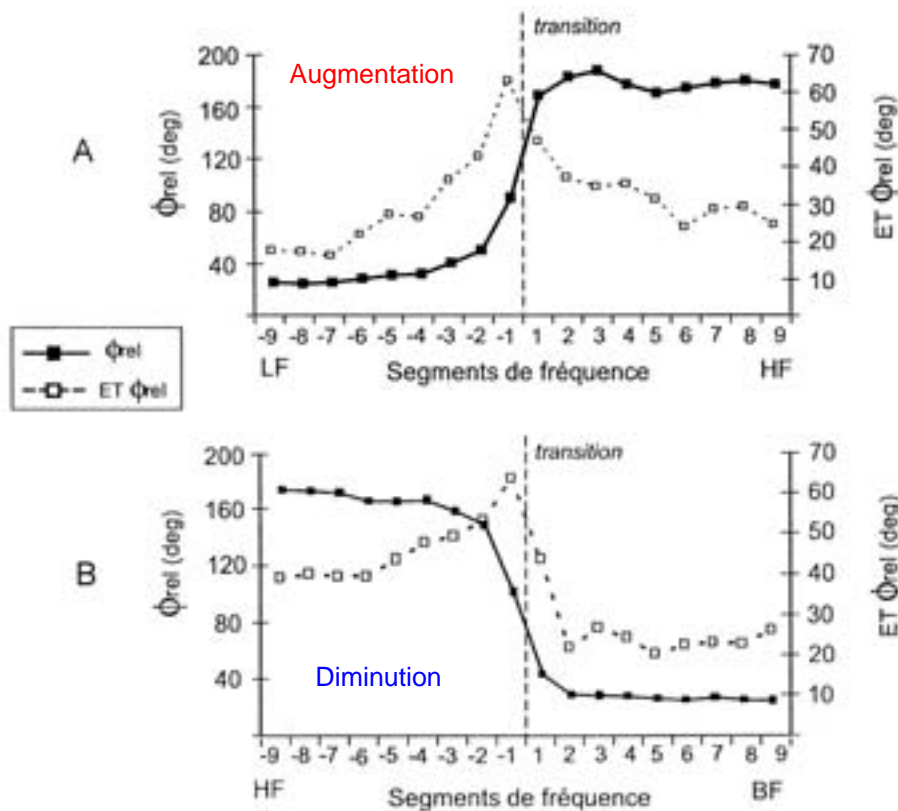


Figure 1.15. Moyenne et écart-type de la phase relative pour le groupe de participants de l'expérimentation de Bardy et al. (2002). Les données sont centrées autour des fréquences d'oscillation de la cible pour lesquelles apparaît la transition de coordination (segment de fréquence -1 et 1). BF et HF signifient respectivement basses fréquences et hautes fréquences. A : condition d'augmentation de la fréquence de la cible. B : condition de diminution de la fréquence de la cible.

### 1.3.2.3. Conclusion

Il est important de souligner la différence de la nature de la tâche utilisée par Bardy et ses collaborateurs par rapport à celle de Nashner et ses collègues (e.g., Nashner & McCollum, 1985). Ces derniers étudient une réponse posturale automatique qui permet de maintenir l'équilibre lors de la perturbation de la surface de support. Pour Bardy et al., le mouvement est intentionnel et la station debout n'est mise en péril que de façon limitée, par les mouvements du sujet lui-même. Malgré ces différences, les patrons de coordination observés sont assez proches. Si on admet une rotation au niveau des hanches dans la stratégie cheville, les stratégies hanches et chevilles peuvent être assimilés aux patrons en phase et en anti-phase, respectivement (Bardy et al., 1999).

En conclusion, les expérimentations menées par Bardy et ses collaborateurs montrent que les modes hanche-cheville en phase et en anti-phase sont incontestablement les seuls patrons de coordination stables qui émergent de la réalisation de la tâche supra-posturale de poursuite de cible. Le mode en phase ( $\phi_{rel} \approx 20^\circ$ ) apparaît pour de petites amplitudes ou faibles fréquences du mouvement de la cible, alors que le mode en anti-phase ( $\phi_{rel} \approx 180^\circ$ ) est produit pour des valeurs plus importantes des paramètres de contrôle. Comme nous l'avons vu précédemment (partie 1.1.3.), l'influence simultanée, et parfois compétitive, de différentes contraintes propres au sujet, à l'environnement, ou à la tâche (intention), détermine l'émergence d'un mode de coordination particulier (Newell, 1986). Dans les différentes expérimentations, de nombreuses contraintes ont en effet été variées à partir de plusieurs paramètres. Les contraintes environnementales ont été modifiées à partir des propriétés de la surface de support (Marin et al., 1999a), de l'amplitude des mouvements de la cible (Bardy et al., 1999 ; Marin et al., 1999a) ou de leur fréquence (Bardy et al., 2002 ; Marin et al. 1999b ; Oullier et al., 2002). Pour les contraintes intrinsèques, les expérimentateurs ont manipulé la hauteur du centre de masse, la longueur des pieds (Bardy et al., 1999), et la raideur du corps (Marin et al., 1999b). Pour finir, l'influence des contraintes intentionnelles, relatives au but de la tâche, a été examinée en donnant l'instruction ou non de suivre les mouvements de la cible (Oullier et al., 2002). Aucune de ces contraintes ne détermine seule la sélection des modes de coordination. La phase relative hanche-cheville résulte de la configuration particulière des différentes contraintes. Ainsi, pour une certaine valeur d'une contrainte donnée, différents modes de coordination peuvent être produits en fonction des valeurs des autres contraintes (Bardy et al., 2002).



Les résultats des expérimentations sur les transitions sont en accord avec une théorie dynamique de la formation de patrons dans le contrôle multi-segmentaire de la posture (Bardy et al., 2002 ; Oullier et al., 2002). Il semble que les états posturaux se comportent comme des attracteurs dans l'espace postural, et que les changements entre les états se comportent comme des transitions de phase auto-organisées entre attracteurs, sans adopter d'état de coordination intermédiaire (Bardy et al., 2002). A partir de ces résultats expérimentaux, nous pouvons nous demander d'une part, s'il est possible de créer un nouvel état postural par l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination hanche-cheville, et d'autre part, en référence à la théorie dynamique de l'apprentissage moteur, si cet apprentissage aura des conséquences sur l'ensemble de la dynamique posturale. C'est l'objet de notre travail. Avant de présenter les expérimentations que nous avons mené dans ce but, il est néanmoins nécessaire de préciser les spécificités du système postural par rapport aux autres systèmes généralement utilisés pour étudier les coordinations inter-segmentaires et leur apprentissage.

### 1.3.3. Spécificités des coordinations posturales

#### **1.3.3.1. Maintien de l'équilibre**

Une première caractéristique de la coordination inter-segmentaire assurant la posture debout est qu'elle doit garantir le maintien de l'équilibre. Les systèmes de coordination généralement étudiés n'ont pas une telle implication. Le problème du maintien de l'équilibre peut être une contrainte qui mène à certaines priorités dans la production de patrons posturaux particuliers. Pour que le corps soit en équilibre, une ligne verticale (la verticale gravitaire) doit passer par le centre de masse et le polygone de sustentation du sujet<sup>6</sup>. Autrement dit, les coordonnées définissant la position horizontale du centre de masse doivent être à l'intérieur de celles qui définissent les limites du polygone de sustentation. Lorsque la verticale gravitaire passant par le centre de masse dépasse le polygone de sustentation, le corps est en déséquilibre et une nouvelle base de support doit être établie (par exemple, grâce à un pas) pour éviter la chute. La Figure 1.16. (d'après Bardy et al., 1999) représente la zone d'équilibre du corps dans l'espace hanche-cheville (zone grisée), ce qui permet de visualiser les combinaisons angulaires (statiques) qui permettent le maintien de l'équilibre. Cette zone est construite à partir des données anthropométriques d'un individu typique : taille de 1.67 m, masse totale de 59 kg, les longueurs, masses, et positions des centres de masse du tronc, des

---

<sup>6</sup> Le polygone de sustentation correspond à une surface virtuelle dont les limites sont définies par les points d'appui des pieds au sol.

membres inférieurs et des pieds étant calculées à partir du modèle de Winter (1990, p. 54-59). La taille et la forme de cette zone d'équilibre varient en fonction de caractéristiques telles que la taille des pieds du sujet, sa taille totale, le rapport de taille tronc/jambe, la hauteur de son centre de masse, sa tonicité musculaire, ou sa flexibilité.

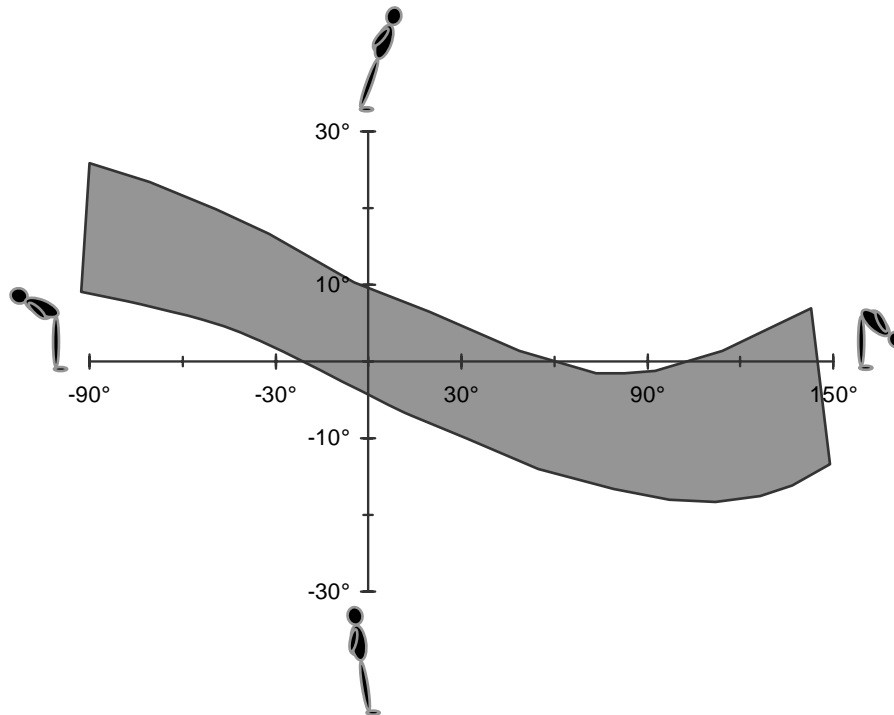


Figure 1.16. Zone d'équilibre (aire grisée) d'un individu typique pour des mouvements posturaux antéropostérieurs. Les axes représentent les positions angulaires des hanches (axe des abscisses) et des chevilles (axe des ordonnées). Les valeurs positives correspondent à une flexion des articulations, et les valeurs négatives, à une extension (d'après Bardy et al., 1999).

### 1.3.3.2. Implication de la totalité du corps

Une deuxième spécificité des coordinations posturales est que l'ensemble du corps est engagé dans le mouvement, ce qui contraste avec les études où la quasi-totalité de l'organisme est immobile durant la tâche. L'étude des coordinations posturales a donc l'intérêt particulier de mettre en jeu un système aux multiples degrés de liberté. Cette caractéristique n'est pas insignifiante au regard des tâches que l'être humain a l'habitude de rencontrer dans sa vie quotidienne. L'étude du système postural est d'autant plus pertinente que le déplacement de l'ensemble du corps n'empêche pas la caractérisation macroscopique de la coordination

posturale par la phase relative entre les articulations des hanches et des chevilles, foyers du mouvement.

### **1.3.3.3. Système d'articulations asymétrique**

Le système hanche-cheville est un système asymétrique. Il met en jeu des membres non-homologues ayant des propriétés mécaniques différentes. Ces différences, principalement relatives à la masse et à la longueur des segments, mènent à des fréquences propres (i.e., des fréquences d'oscillations préférées lorsque ces segments sont bougés de façon indépendante, voir la partie 1.1.9.) qui sont différentes. Le fait que la coordination concerne des membres non-homologues peut expliquer une précision et une stabilité moindre que pour d'autres systèmes effecteurs (pour des tâches bi-manuelles par exemple). En effet, cette moins bonne précision et stabilité pour la coordination de membres non-homologues par rapport aux membres homologues a été observée à plusieurs reprises (Kelso & Jeka, 1992 ; Swinnen, Dounskaia, Verschueren, Serrien, & Daelman, 1995 ; Serrien & Swinnen, 1997) et peut être expliquée par les lois de la physique (cf. Riley et al., 2001). D'autre part, l'asymétrie du système peut être à l'origine du décalage du patron hanche-cheville en phase par rapport à la phase relative pure de 0°. Cette déviation a été modélisée théoriquement (voir la partie 1.1.9.), mais a aussi été montrée expérimentalement (e.g., Baldissera, Cavallari, Marini, & Tassone, 1991). L'étude de la coordination au sein d'un système asymétrique est particulièrement intéressante car elle peut s'appliquer à beaucoup plus de situations que le cas symétrique, relativement rare (e.g., Kelso, 1994b). Il est en effet plus fréquent dans les activités "naturelles" (dans le sens, non expérimentale) que des composants ayant des propriétés intrinsèques différentes soient coordonnés.

### **1.3.3.4. Articulations couplées**

Le système postural possède également la spécificité de coupler le mouvement d'articulations qui sont interdépendantes mécaniquement. Cette propriété est particulièrement manifeste par rapport au maintien de l'équilibre évoqué plus haut : dans de nombreux cas, une position articulaire donnée ne permet de maintenir l'équilibre que si l'autre articulation adopte une position compatible.

### **1.3.3.5. Patron de coordination spontané**

La dernière particularité des coordinations posturales que nous évoquerons ici n'est pas des moindres car elle concerne la nature de la tâche qui est demandée aux participants. Dans

les expérimentations sur le contrôle ou l'apprentissage moteur qui utilisent la phase relative inter-segmentaire comme variable collective, les participants ont bien souvent l'instruction de produire un mode de coordination particulier (présence d'une information comportementale). Même lorsque les transitions vers des modes non exigés sont étudiées grâce à la variation d'un paramètre de contrôle, le but initial de la tâche est spécifique à un patron de coordination donné. Les modes hanche-cheville en phase et en anti-phase observés par Bardy et al. (e.g., 1999, 2002) pour le système postural, émergent, au contraire, à partir d'un but qui n'est pas la coordination elle-même. Les participants ont pour instructions de suivre les mouvements antéropostérieurs de la cible (voir la partie 1.3.2.), et en théorie, ce but peut être atteint par n'importe quelle relation de phase entre les mouvements des hanches et des chevilles (d'où le terme de tâche supra-posturale). La nature de cette tâche est très différente de celles qui sont classiquement utilisées dans les études sur les coordinations, et plus particulièrement, dans le cadre de notre travail, dans les études sur l'apprentissage moteur selon une approche dynamique (voir la partie 1.2.). Il semble primordial de prendre en compte cette différence dans la suite de ce travail et nous utiliserons le terme de *coordinations spontanées* pour qualifier les modes de coordination qui émergent de la réalisation de la tâche supra-posturale, c'est-à-dire lorsque aucune instruction ne spécifie la phase relative à produire.

## **1.4. Apprentissage de coordinations posturales**

### 1.4.1. Objectifs de l'étude

Les spécificités des coordinations posturales que nous venons de décrire en font un outil d'étude original pour investiguer la question fondamentale de l'approche dynamique de l'apprentissage moteur : comment les coordinations naturellement réalisables de façon stable affectent-elles l'apprentissage d'une coordination nouvelle, non spontanée, et quelles vont être les conséquences de cet apprentissage sur les modes préexistants ? Le but de notre travail est de comprendre les interactions entre coordinations initiales et apprises à partir du système postural. La condition fondamentale pour examiner cette question est d'avoir identifié la dynamique intrinsèque du système effecteur support de l'étude (e.g., Zanone & Kelso, 1994). Le système postural satisfait totalement cette condition grâce aux travaux antérieurs menés par Bardy et ses collaborateurs. Les patrons de coordination posturaux intrinsèques ainsi que la transition entre ces patrons, ont en effet été mis au jour grâce à la phase relative hanche-

cheville. Les modes en phase ( $\phi_{rel} \approx 20^\circ$ ) et en anti-phase ( $\phi_{rel} \approx 180^\circ$ ) entre les mouvements des hanches et des chevilles sont les seuls états posturaux observés dans les multiples conditions de contraintes testées (Bardy et al., 1999, 2002 ; Marin et al., 1999a, 1999b ; Oullier et al., 2002). Cette conjoncture nous permet d'appréhender la question de l'apprentissage pour un système effecteur totalement nouveau. En effet, les études dynamiques de l'apprentissage moteur menées jusqu'alors sont quasi exclusivement bi-manuelles.

Le système postural présente des caractéristiques - que nous avons décrites précédemment - encore non investiguées. Il permet notamment d'élargir les observations expérimentales effectuées sur le système bi-manuel à un système mettant en jeu des membres non-homologues (i.e., un système asymétrique). Malgré leurs spécificités, les coordinations posturales (e.g., Bardy et al., 1999, 2002) présentent déjà de nombreuses similitudes avec la dynamique d'autres systèmes effecteurs, plus communément étudiés, comme les coordinations bi-manuelles. Ainsi, les coordinations hanche-cheville présentent elles aussi deux patrons intrinsèques, en phase et en anti-phase, ainsi que les signatures dynamiques des transitions de phase entre ces deux modes (multi-stabilité, bifurcation, fluctuations critiques, hystérésis et ralentissement critique). Est-ce que les analogies entre les systèmes effecteurs sont aussi effectives du point de vue de l'apprentissage ? Le système postural est un outil permettant d'évaluer à quel point les mécanismes de l'apprentissage sont indépendants des systèmes effecteurs impliqués.

De plus, la tâche supra-posturale permet d'investir les questions de l'apprentissage pour un type de tâche non étudié auparavant, où la coordination émerge sans qu'elle soit requise. Nous avons souligné que les propriétés du système postural relatives à l'implication de la totalité du corps et à l'asymétrie étaient communes à la majorité des systèmes engagés dans les activités quotidiennes. Ici encore, la nature d'une tâche dont le but n'est pas la coordination elle-même s'apparente plus à celle de nos actions de tous les jours. Bien sûr, les tâches que nous demandons à nos participants sont loin d'être courantes, mais elles présentent des caractéristiques inexplorées qui peuvent permettre d'identifier les analogies ou les différences de résultats par rapport aux autres travaux. L'étude du système postural peut donc amener des pistes nouvelles à la compréhension des mécanismes de l'apprentissage moteur.

Cinq expérimentations ont été menées. Quatre d'entre elles suivent des protocoles sous forme de pré-test / post-test. Les coordinations posturales initiales sont testées avant toute pratique (pré-test), les participants apprennent ensuite une phase relative non spontanée entre les hanches et les chevilles (session d'apprentissage), puis la tâche du pré-test est reconduite lors d'un post-test afin d'explorer les modifications des coordinations initiales induites par la pratique. L'objectif des expérimentations 1 et 2 est d'analyser les interactions entre les patrons *spontanés* et l'apprentissage d'une phase relative de  $135^\circ$  entre les hanches et les chevilles. La tâche supra-posturale de poursuite de cible est utilisée pour le pré-test et le post-test. Selon les caractéristiques de fréquence et d'amplitude des mouvements de la cible, les expérimentateurs peuvent favoriser l'émergence du patron hanche-cheville en phase ou en anti-phase. L'expérimentation 1 identifie l'évolution du patron de coordination à apprendre de  $135^\circ$  avec la quantité de pratique. Les conséquences de l'apprentissage sont évaluées sur le patron spontané en anti-phase, et mises en relation avec la stabilité initiale des participants. L'expérimentation 2 analyse à la fois les patrons en phase et en anti-phase, et ce, avant, après, mais aussi pendant la pratique. La présence de tests intermédiaires permet d'identifier la façon dont évoluent les modes de coordination spontanés avec l'augmentation de la quantité de pratique. De plus, un test de rétention mené une semaine après la session d'apprentissage évalue la persistance de la performance du patron appris et des éventuels changements au niveau des patrons spontanés.

Après avoir investigué comment les modes spontanés (i.e., émergeant lors de la tâche supra-posturale) affectaient et étaient affectées par l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination, il nous a semblé important d'étudier les patrons spécifiés par information comportementale, et ce pour deux raisons majeures :

(a) L'utilisation d'une nature de tâche différente rend problématique la comparaison des expérimentations 1 et 2 avec l'ensemble des études sur l'apprentissage (relatives aux coordinations bi-manuelles).

(b) La tâche de la cible ne permet pas de tester des coordinations précises. Par exemple, avec cette tâche, nous ne pouvons pas observer les éventuels changements pouvant s'opérer sur d'autres coordinations que celles qui émergent spontanément.

Etape préalable aux expérimentations 4 et 5, l'expérimentation 3 délaisse la question de l'apprentissage pour analyser la dynamique de coordination sur une large gamme de phases relatives hanche-cheville requises. Pour cela, les participants sont placés devant un écran sur

lequel sont projetés en temps réel leurs mouvements de hanches et de chevilles sous forme d'une figure de Lissajous. Ils doivent suivre la phase relative modèle qui leur est fournie sur cette figure. Pour chaque patron exigé, les participants débutent avec ce dispositif (feedback augmenté), puis doivent reproduire la même coordination sans avoir ce retour visuel. Dans l'expérimentation 4, nous revenons au cœur du sujet en testant la performance de phases relatives requises avant et après l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination. Un dispositif de feedback augmenté identique à celui de l'expérimentation 3 est utilisé. Nous choisissons d'analyser quatre modes de coordination lors des sessions de test : la phase relative apprise,  $90^\circ$ , son symétrique non pratiqué,  $270^\circ$ , la phase et l'anti-phase. Le test des patrons en phase et en anti-phase permet d'observer les effets de l'apprentissage sur les patrons initiaux requis (contrairement aux expérimentations 1 et 2), et le test du patron de  $270^\circ$  concerne la question du transfert d'apprentissage entre le patron appris et son symétrique. Il est en effet intéressant de se demander si, à l'instar du système bi-manuel, l'apprentissage d'une coordination pour un système asymétrique se fait indépendamment de l'ordre entre ses composants. Les participants sont soumis aux sessions de test avant, pendant, juste après, et une semaine après la pratique (test de rétention).

Les résultats obtenus dans les expérimentations 3 et 4, et leur confrontation à ceux des expérimentations 1 et 2 soulèvent de nombreuses questions sur l'importance de la nature de la tâche (coordination spontanée vs. imposée). Ces interrogations nous ont mené dans l'expérimentation 5, à observer les conséquences de l'apprentissage d'une phase relative de  $90^\circ$  à la fois sur les coordinations spontanées et les coordinations requises par information comportementale. Cette fois, une technique de balayage est utilisée afin de tester l'ensemble de la dynamique intrinsèque (i.e., de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  de phase relative) avant, juste après, et une semaine après la pratique. L'objectif de l'expérimentation 5 est de comprendre comment les patrons de coordination posturaux spontanés et leur évolution due à l'apprentissage, se reflètent sur les caractéristiques des patrons requis par information comportementale.

## 1.4.2. Concernant l'analyse des données

### **1.4.2.1. Calcul de la phase relative**

Avant de présenter notre travail expérimental, il nous a semblé utile de préciser quelque peu les choix que nous avons effectués concernant l'analyse des données. Comme

nous l'avons vu dans le chapitre précédent, nous caractérisons la coordination posturale grâce à la phase relative entre le mouvement des hanches et des chevilles. Dans la littérature sur la coordination inter-segmentaire, deux méthodes sont généralement utilisées : le calcul de la phase relative ponctuelle et le calcul de la phase relative continue. La phase relative ponctuelle (ou phase relative discrète) est calculée à partir des pics de flexion et/ou d'extension des articulations. La différence de temps entre deux événements similaires au niveau des deux articulations (e.g., flexion articulaire maximale) est rapportée sur la période du cycle d'une des articulations, prise en tant que référence. Ce rapport est exprimé en degré (la période du cycle de référence correspond à  $360^\circ$ ) afin de traduire la nature circulaire de la phase relative. La partie supérieure de la Figure 1.17. montre les événements correspondants aux valeurs de temps prélevées pour effectuer ce calcul. Pour cet exemple le calcul de la phase relative discrète est donné par

$$\phi_{rel} = \frac{(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_0)} \times 360^\circ \quad (4)$$

Contrairement à la phase relative ponctuelle, la phase relative continue se calcule à partir de l'espace des phases (position vs. vitesse). Il s'agit à chaque instant, de faire la différence entre les phases des deux articulations (voir la partie 1.1.5.) de la façon suivante :

$$\phi_{rel} = \tan^{-1}\left(\frac{\dot{X}_1}{X_1}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\dot{X}_2}{X_2}\right) \quad (5)$$

$X_1$  et  $X_2$  étant les positions de chaque articulation, et  $\dot{X}_1$  et  $\dot{X}_2$ , les vitesses.

Il est parfois considéré que la précision de la phase relative continue est plus importante que celle de la phase relative discrète. Outre le problème de la normalisation que nous n'aborderons pas ici (voir Kurz & Stergiou, 2002), la non harmonicité des mouvements oscillatoires des segments corporels peut mener à un biais de la valeur de phase relative lorsqu'elle est calculée de façon continue. Peters, Haddad, Heiderscheit, Van Emmerik, et Hamill (2003), mette en évidence ce problème en analysant des signaux théoriques (voir aussi Zanone & Kelso, 1997, pour une comparaison des deux méthodes sur des données expérimentales). Les auteurs calculent la phase relative continue entre une sinusoïde biaisée et la même sinusoïde décalée dans le temps de 5 % et 35 % ( $18^\circ$  et  $126^\circ$ ) par rapport à la période du signal originel. La Figure 1.17. montre les signaux ainsi obtenus dans le domaine temporel, et l'évolution de la valeur de la phase relative continue correspondante. Nous pouvons



observer que le décalage de phase appliqué mathématiquement sur le deuxième signal n'est pas retrouvé par le calcul de la phase relative continue. Bien que les deux signaux soient parfaitement identiques, et décalés dans le temps avec une valeur constante, la phase relative continue présente des fluctuations importantes. De plus, la forme de ces fluctuations est dépendante de l'harmonicité des signaux initiaux, ainsi que de leur décalage temporel. Peters et al. (2003) soulignent que les phases relatives discrète et continue fournissent des informations différentes : par exemple, une phase relative continue de  $180^\circ$  ne signifie pas que les signaux se déplacent dans des directions opposées. Ils concluent que la phase relative continue calculée sur des signaux non-harmoniques ne traduit pas leur relation dans le domaine temporel.

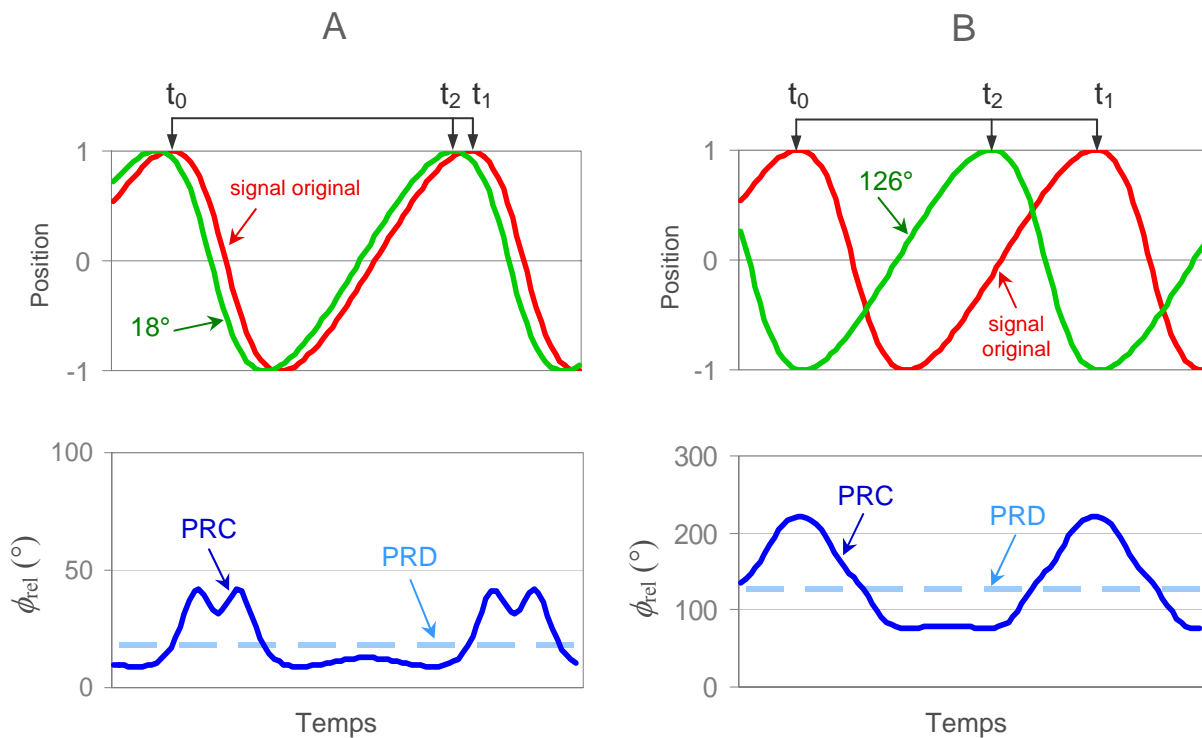


Figure 1.17. Evolution de la position et de la phase relative en fonction du temps pour les décalage de  $18^\circ$  (A) et de  $126^\circ$  (B) de phase relative entre les signaux. En haut : sinusoïdes biaisées au cours du temps. En bas : phase relative continue (PRC) correspondante entre les deux signaux. La ligne en pointillés représente la phase relative discrète (PRD) correspondant au décalage de phase entre les deux signaux. D'après Peters et al. (2003).

Dans le cadre du mouvement humain, il est plus que probable que les mouvements de flexion-extension articulaires ne suivent pas une sinusoïde harmonique. La phase relative discrète reste donc la meilleure estimation du rapport temporel entre les mouvements oscillatoires de deux segments. C'est cet indice que nous utiliserons pour caractériser la coordination hanche-cheville dans notre travail expérimental.

#### 1.4.2.2. Traitement statistique

Le caractère circulaire de la phase relative implique l'utilisation d'analyses appropriées. Les statistiques circulaires utilisent des outils trigonométriques qui permettent de prendre en compte que  $0^\circ$  et  $360^\circ$  sont des valeurs identiques (Batschelet, 1981 ; Fisher, 1995 ; Mardia, 1972 ; Mardia & Jupp, 2000). Le problème peut être mis en évidence à partir d'un exemple très simple issu de Batschelet (1981, p. 7). Soit trois valeurs angulaires de  $80^\circ$ ,  $350^\circ$  et  $50^\circ$ . La représentation de ces valeurs sur un cercle trigonométrique permet d'identifier de façon évidente que la moyenne de ces trois angles devrait se situer entre  $0^\circ$  et  $50^\circ$ . Or, si l'on applique une méthode linéaire, nous obtenons  $(80 + 350 + 50) / 3 = 160^\circ$ . Il est clair que ce résultat n'est pas acceptable. Si l'on remplace  $350^\circ$  par l'angle équivalent de  $-10^\circ$ , le résultat linéaire est plus juste :  $(80-10+50)/3 = 40^\circ$ . Néanmoins, lorsque plus de deux valeurs sont comprises sur une étendue supérieure à  $180^\circ$ , il n'existe plus de solution possible pour appliquer la méthode linéaire. Dans ce cadre, toutes nos mesures de tendance centrale et de dispersion seront effectuées de façon circulaire suivant les méthodes décrites par Batschelet (1981, pp. 7-9, 33-35, 85-87) et Mardia et Jupp (2000, pp. 15-20). Lorsqu'il s'agit de comparer des distributions, les méthodes circulaires peuvent présenter certains inconvénients.

En effet, contrairement aux statistiques linéaires, les statistiques circulaires disposent de peu d'outils pour analyser des plans d'expériences à plusieurs facteurs et/ou à plusieurs niveaux. Les effets d'interaction, notamment, ne sont pas évaluables. Beaucoup d'études utilisant la phase relative comme variable collective de la coordination inter-segmentaire, contournent ce problème en calculant l'erreur absolue entre la valeur produite et la valeur attendue (i.e., valeur absolue de la différence entre ces deux valeurs). L'étendue des données est alors réduite à  $180^\circ$  au lieu de  $360^\circ$ , ce qui limite les erreurs dues à l'application de statistiques linéaires. Concernant nos essais sur la tâche supra-posturale, nous ne pouvons pas calculer d'erreur étant donné que nous ne demandons pas de patron particulier aux participants. Les valeurs de phase relative que nous obtenons sur ces essais peuvent donc se distribuer sur l'ensemble du cercle trigonométrique, et leur appliquer des statistiques linéaires

n'aurait aucun sens. Pour les coordinations spontanées, nous utiliserons donc exclusivement des statistiques circulaires, qui nous limitent à des comparaisons de distribution par paires avec le test de Watson-Williams (Batschelet, 1981, pp. 95-98 ; Mardia & Jupp, 2000, pp. 128-130). Par contre, lorsque l'étendue de la distribution est réduite (inférieure à  $180^\circ$ ), les méthodes circulaires vs. linéaires mènent à des différences négligeables ; nous pouvons donc utiliser des ANOVAs et ainsi tester les effets d'interaction qui existent entre nos différents facteurs expérimentaux.

# CHAPITRE 2

---

---

## Coordinations Spontanées et Apprentissage

## 2.1. Introduction

Dans deux premières expérimentations, nous nous intéressons aux questions soulevées par l'approche dynamique de l'apprentissage moteur avec un point de vue original par rapport à deux aspects. Tout d'abord, contrairement au système bi-manuel généralement étudié, le système postural présente certaines particularités que nous avons décrites précédemment, notamment du point de vue de l'asymétrie des segments coordonnés. Il permet donc de confronter les résultats observés lors de l'apprentissage d'une coordination entre membres homologues et non-homologues. D'autre part, nous observons les conséquences de l'apprentissage sur la dynamique de coordination intrinsèque grâce à une tâche où le patron émerge spontanément, sans être le but de la tâche. Dans les expérimentations menées jusqu'à présent, la dynamique de coordination était testée à partir de tâches où les participants avaient l'instruction de produire un mode de coordination spécifique. Dans leur agenda expérimental, Zanone et Kelso (1994) font la prédiction théorique que le patron appris devient une part intégrante de la dynamique de coordination. Ils soulignent que cette prédiction implique que le patron appris devienne un état attractif *en absence* d'exigence spécifique de la tâche (Zanone & Kelso, 1994, p. 484), c'est-à-dire lorsque le mode de coordination à produire n'est pas requis. La tâche supraposturale utilisée précédemment par Bardy et collaborateurs (e.g., Bardy et al., 1999, 2002) permet d'évaluer cette prédiction. Dans cette tâche, le but pour les participants est de garder une distance constante entre la tête et une cible qui se déplace virtuellement sur un axe antéropostérieur. Aucune instruction n'est donnée sur la coordination à adopter pour atteindre ce but, celle-ci émerge donc spontanément. La tâche de poursuite de cible nous permet donc d'examiner si une session de pratique durant laquelle une phase relative hanche-cheville de 135° est requise, permet l'apparition spontanée de ce mode pour une tâche où, théoriquement, n'importe quelle coordination permettrait de satisfaire le but de la tâche. Si le patron appris devient un mode attracteur de la dynamique de coordination, nous devrions observer une modification du patron spontané – à partir d'un mode hanche-cheville en phase ou en anti-phase avant apprentissage (patrons posturaux intrinsèques identifiés dans les expérimentations antérieures) – vers le mode de coordination appris. L'apprentissage d'un nouveau mode se ferait donc au détriment de l'émergence des patrons spontanés initiaux. L'objectif principal des deux expérimentations présentées ici est de tester cette hypothèse.

Dans les expérimentations 1 et 2, le mode de coordination hanche-cheville spontané des participants est identifié grâce à la tâche supra-posturale de poursuite de cible, avant et à différents moments du processus d'apprentissage d'un nouveau patron. La coordination à apprendre correspond à une phase relative de  $135^\circ$  entre les hanches et les chevilles. Nous choisissons le patron de  $135^\circ$  pour deux raisons. Premièrement, dans les expérimentations antérieures sur les coordinations posturales (voir la partie 1.3.2.), ce mode hanche-cheville n'est jamais apparu de façon spontanée et stable lors de la tâche de poursuite de cible. Dans les différentes expérimentations menées, Bardy et ses collaborateurs ont testé de nombreuses conditions de contraintes, notamment du point de vue de la fréquence des mouvements de la cible (comprises entre 0.05 et 0.80 Hz) et de leur amplitude (comprises entre 4 et 83 cm), sans jamais observer de patron différent de la phase ou de l'anti-phase de façon stable. Le patron de coordination de  $135^\circ$  est donc un mode *non-spontané*, c'est-à-dire un mode qui n'a jamais émergé lors de la réalisation de la tâche supra-posturale. Deuxièmement,  $135^\circ$  s'est révélé être moins contraignant que la phase relative de  $90^\circ$ , classiquement apprise dans les expérimentations étudiant l'apprentissage pour le système bi-manuel. En effet, en l'absence de dispositif permettant de fournir au participant des informations précises sur le patron de coordination à produire et/ou sur l'exactitude du patron produit, des expérimentations préliminaires ont montré que  $90^\circ$  était un mode particulièrement difficile à produire. La principale cause de cette difficulté est sans doute d'origine mécanique. En effet, comparé à  $135^\circ$ ,  $90^\circ$  est une coordination hanche-cheville qui met davantage l'équilibre en péril. Pour une même amplitude articulaire, le patron postural de  $90^\circ$  mène davantage à des situations de déséquilibre qu'une coordination de  $135^\circ$  (Figure 2.1.).

L'apprentissage de la phase relative hanche-cheville de  $135^\circ$  permet d'évaluer si ce mode, *requis* pendant la pratique, va influencer les modes de coordination en phase et en anti-phase qui apparaissent de façon *spontanée* lors de la réalisation de la tâche supra-posturale. L'expérimentation 1 se focalise sur l'interaction entre le mode intrinsèque en anti-phase et l'apprentissage de  $135^\circ$ . En plus de l'influence de l'apprentissage sur le mode de coordination spontané, nous analysons l'influence inverse : les caractéristiques du patron initial affectent-elles le processus d'apprentissage ? Dans les études sur les coordinations bi-manuelles (e.g., Lee et al., 1995 ; Swinnen et al, 1997 ; Zanone & Kelso, 1992a), une attraction vers les patrons intrinsèques a été constatée en début

d'apprentissage. Nous examinerons si un résultat comparable est observé pour l'apprentissage de la coordination posturale de  $135^\circ$ . Le protocole de l'expérimentation 1 est composé de trois étapes réalisées sur deux jours : le pré-test, la session d'apprentissage de  $135^\circ$ , et le post-test. Le pré-test et le post-test permettent d'identifier le mode de coordination spontané à l'aide de la tâche de poursuite de cible. Dans l'expérimentation 2, deux groupes de participants sont constitués afin d'étudier l'influence de l'apprentissage de  $135^\circ$  à la fois sur les modes spontanés en phase et en anti-phase. D'autre part, les patrons spontanés ne sont plus seulement testés avant et après, mais aussi lors de tests intermédiaires au cours du processus d'apprentissage. Il est ainsi possible d'observer de façon plus progressive la modification du patron spontané. Pour finir, la persistance des modifications du patron spontané et la performance du patron appris sont évaluées lors d'un test de rétention mené une semaine après la session d'apprentissage.

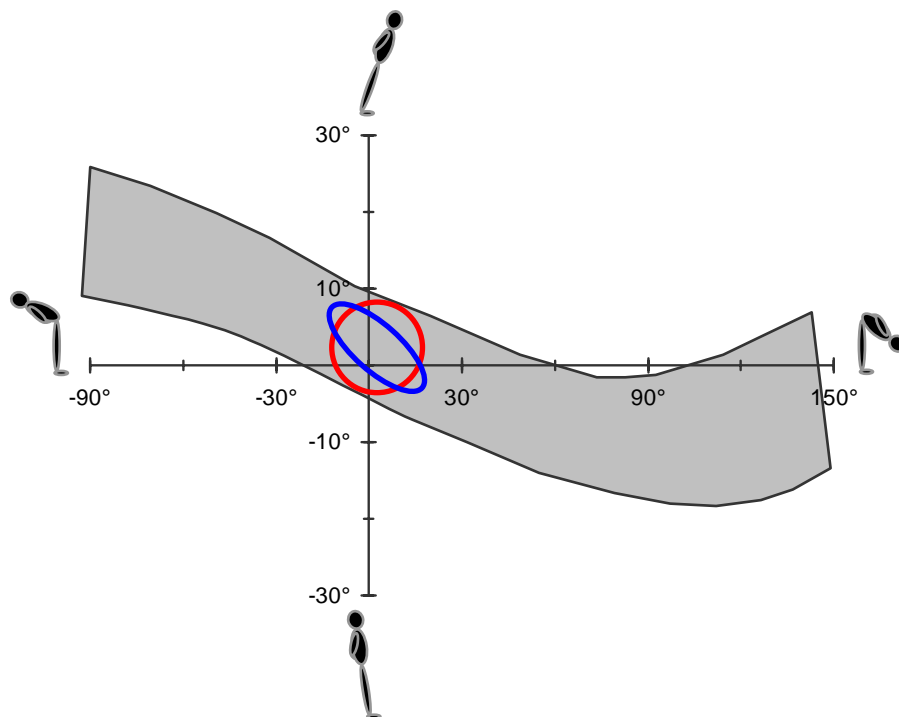


Figure 2.1. Représentation d'une phase relative hanche-cheville de  $90^\circ$  (cercle rouge) et de  $135^\circ$  (ellipse bleue) dans l'espace hanche cheville (figure de Lissajous). L'aire grisée correspond à la zone d'équilibre. Pour une même amplitude articulaire ( $\approx 12^\circ$  pour les chevilles et  $32^\circ$  pour les hanches dans l'exemple donné ici), la phase relative de  $90^\circ$  avoisine plus les limites du maintien de l'équilibre debout que celle de  $135^\circ$ .

Les données sont analysées par groupe, mais aussi individuellement, afin de mettre au jour d'éventuelles différences de comportement entre les participants. En effet, de nombreux paramètres tels que les propriétés anthropométriques ou le passé sportif peuvent être à l'origine de telles différences interindividuelles. L'utilisation systématique d'analyses individuelles, permet de remédier au biais qui peut être induit par l'hétérogénéité des participants lors de l'analyse par groupe.

## **2.2. Expérimentation 1**

### 2.2.1. Méthode

#### **2.2.1.1. Participants**

Vingt quatre participants masculins, étudiants ou personnel de l'Université de Paris Sud 11, participent à l'expérimentation de façon bénévole. Aucun de ces participants ne rapporte de défaut visuel (vision normale ou corrigée) ou de trouble de l'équilibre. Tous les participants sont naïfs par rapport aux objectifs de l'étude et prennent part pour la première fois à une expérimentation sur les coordinations posturales. Le groupe expérimental est composé de quinze participants âgés de 19 à 26 ans ( $M = 22.00$ ,  $ET = 2.17$ ). Leur taille moyenne est de 177.20 cm ( $ET = 7.22$ ), et leur poids moyen de 72.60 kg ( $ET = 13.22$ ). Les neuf autres participants, âgés de 21 à 42 ans ( $M = 26.22$ ,  $ET = 6.70$ ) constituent le groupe contrôle. Leur taille moyenne est de 174.78 cm ( $ET = 8.29$ ), et leur poids moyens de 69.11 kg ( $ET = 7.91$ ).

#### **2.2.1.2. Tâches et Dispositif expérimental**

Pour le groupe expérimental, les participants réalisent deux sessions de test durant lesquelles le patron hanche-cheville spontané est identifié grâce à une tâche de poursuite de cible. Entre ces deux sessions de test menées au début (pré-test) et à la fin de l'expérimentation (post-test), les participants suivent une session d'apprentissage qui consiste à pratiquer une phase relative non spontanée de  $135^\circ$  entre les hanches et les chevilles. Ces trois étapes expérimentales (pré-test, apprentissage et post-test) sont réalisées sur deux jours consécutifs. Les participants du groupe contrôle ne sont soumis qu'à la tâche de poursuite de cible et ne sont donc pas concernés par la session d'apprentissage.



*Dispositif général.*

Les participants sont debout, pieds nus écartés à largeur des hanches, mains jointes dans le dos. Deux électro-goniomètres sont placés au niveau des centres articulaires de la hanche et de la cheville afin de mesurer les déplacements angulaires de ces deux articulations. Le premier électro-goniomètre est placé sur la face externe de la hanche gauche, de la crête iliaque au grand trochanter, et le deuxième sur la face antérieure de la cheville gauche, du deuxième métatarse au tiers inférieur du tibia. Les données des électro-goniomètres sont enregistrées à une fréquence de 50 Hz sur un ordinateur PC à l'aide de l'interface d'acquisition Datalink (Biometrics, Inc.). Leur précision est de 1°. Pour toutes les étapes de l'expérimentation, les participants des deux groupes ont pour consigne de garder les genoux tendus durant les essais. De plus, on leur demande de maintenir la totalité de la surface des pieds en contact avec le sol. Afin de contrôler que les sujets respectent cette consigne, un dispositif électrique est placé sous le pied droit des participants. Ce dispositif signale la perte de contact des orteils ou des talons avec le sol par l'extinction d'une diode électroluminescente. Si le contact est perdu plus de trois fois par essai, celui-ci est annulé et recommencé.

*Sessions de test.*

Pour les sessions de test du groupe expérimental (pré-test et post-test), les participants sont face à un écran d'ordinateur (43 cm de diagonale) situé à 1 mètre de distance et positionné à hauteur des yeux. Une cible multicolore carrée (15.7 cm × 15.7 cm) sur fond noir est représentée sur cet écran. L'expansion et la contraction de la cible simulent son oscillation sur un axe antéropostérieur avec une amplitude de 10 cm pic à pic (Figure 2.2.). Les participants ont pour instruction de garder une distance constante entre la tête et la cible, de façon à ce que les mouvements de la tête soient synchronisés à ceux de la cible et que leurs amplitudes soient identiques. Chaque essai comprend 10 oscillations de la cible (soit 10 allers-retours) qui induisent 10 cycles de mouvements posturaux. Les seules consignes données aux participants pour réaliser cette tâche supra-posturale sont de garder les genoux tendus, de ne pas faire de mouvement au niveau du cou et de conserver les pieds en contact avec le sol. Cette tâche a pour but d'identifier le mode de coordination spontané adopté par chaque participant à un moment donné du processus d'apprentissage.

La fréquence d'oscillation de la cible est définie pour chaque participant. Avant de commencer l'expérimentation proprement dite, nous leur demandons d'effectuer la tâche supra-posturale à différentes fréquences d'oscillation de la cible : .25 Hz, .35 Hz, .45 Hz, .55 Hz, et .65 Hz pour le groupe expérimental, et .25 Hz, .45 Hz, et .65 Hz pour le groupe contrôle. Un essai par fréquence est effectué. La fréquence d'oscillation sélectionnée correspond à celle pour laquelle le participant présente la phase relative hanche-cheville la plus stable (i.e., l'écart-type de phase relative le plus faible). C'est à cette fréquence personnalisée que l'on enregistre le pré-test et le post-test pour le groupe expérimental, ainsi que l'ensemble des essais pour le groupe contrôle. La sélection de la fréquence du mouvement de la cible permet ainsi de garantir que la coordination spontanée identifiée présente une stabilité maximale.

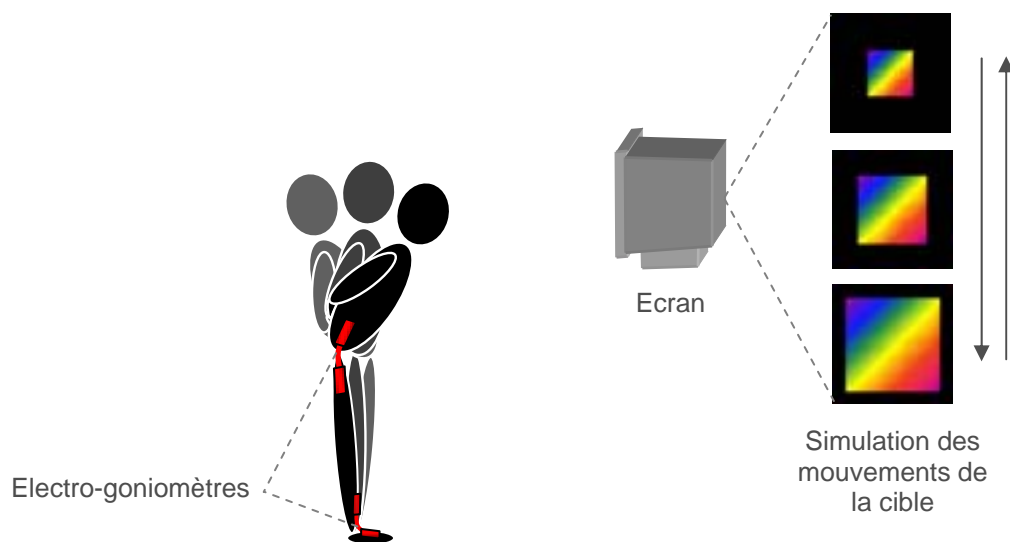


Figure 2.2. Dispositif expérimental pour le groupe contrôle et les sessions de test (pré-test et post-test) du groupe expérimental.

#### *Session d'Apprentissage.*

La session d'apprentissage est suivie uniquement par le groupe expérimental. Durant cette session, les participants doivent produire une phase relative de  $135^\circ$  entre les hanches et les chevilles sans qu'il y ait de cible à suivre. La coordination à apprendre est d'abord présentée de façon schématique, comme l'illustre la Figure 2.3. L'expérimentateur explique au participant que les flèches bleues indiquent une flexion de l'articulation, les

flèches rouges une extension, en bas pour les chevilles et en haut pour les hanches. A partir de la station verticale, le mouvement débute par une flexion des chevilles, les hanches formant un angle de  $0^\circ$ , puis il y a flexion des hanches pendant que les chevilles reviennent en extension. Les chevilles continuent ensuite leur extension pendant que les hanches la débute, les chevilles reviennent alors en flexion tandis que les hanches terminent leur extension, et enfin, les chevilles finissent leur flexion et les hanches l'amorcent. L'expérimentateur effectue une démonstration du mouvement et en explique les différentes étapes jusqu'à ce que le participant réussisse à reproduire l'ensemble du mouvement plusieurs fois de suite. Après cette étape explicative, les participants effectuent les essais de pratique, en enchaînant 10 cycles d'oscillation par essai. Aucune contrainte n'est donnée quant à l'amplitude ou à la durée du mouvement.

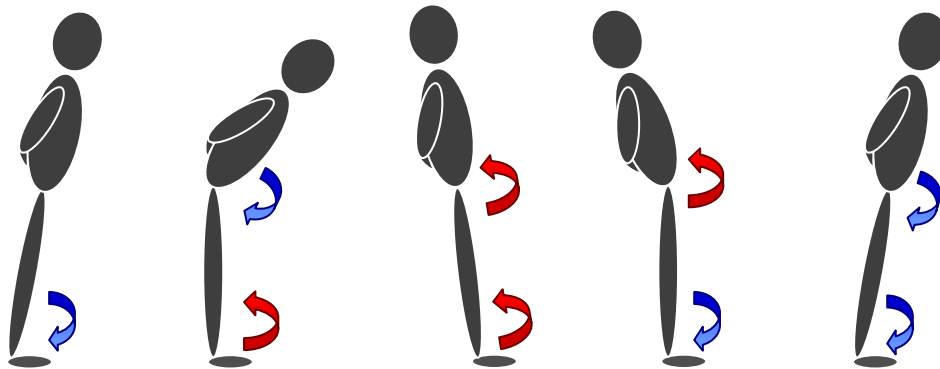


Figure 2.3. Représentation schématique de la phase relative à apprendre de  $135^\circ$ .  
Voir le texte pour les détails.

### 2.2.1.3. Procédure

#### *Groupe expérimental.*

Pour le groupe expérimental, l'expérimentation se déroule en trois étapes réalisées sur deux jours consécutifs (Figure 2.4.). La durée de l'expérimentation par participant est approximativement de 50 minutes pour chaque jour. Le premier jour, après avoir défini la fréquence de la cible de façon individuelle, les participants réalisent un pré-test qui permet d'identifier le patron de coordination spontané. Ce pré-test est constitué de 4 essais (10 cycles par essai) sur la tâche de poursuite de cible. Ils apprennent ensuite un mode non

spontané dont la relation de phase hanche-cheville est de  $135^\circ$ . Ce mode de coordination est pratiqué pendant 15 essais le premier jour, et 15 autres le deuxième jour, soit 300 cycles de pratique au total (chaque essai comprend 10 cycles). Durant les périodes d'apprentissage, les participants disposent tous les trois essais de trois minutes de pause, durant lesquelles ils peuvent s'asseoir. Lors de cette pause, un feedback visuel leur est donné sur l'essai qui vient d'être réalisé (Figure 2.5.). Ce feedback, présenté sous forme de graphiques sur un moniteur d'ordinateur, permet aux participants de constater l'écart entre ce qui est attendu et ce qu'ils ont produit. L'expérimentateur explique et commente les graphiques en donnant, si nécessaire, des informations pour corriger le mouvement. Pour finir, à la fin du deuxième jour, la tâche du pré-test est reconduite lors d'un post-test (4 essais sur la tâche de poursuite de cible), afin d'observer les effets de l'apprentissage du nouveau patron sur la coordination spontanée initiale.

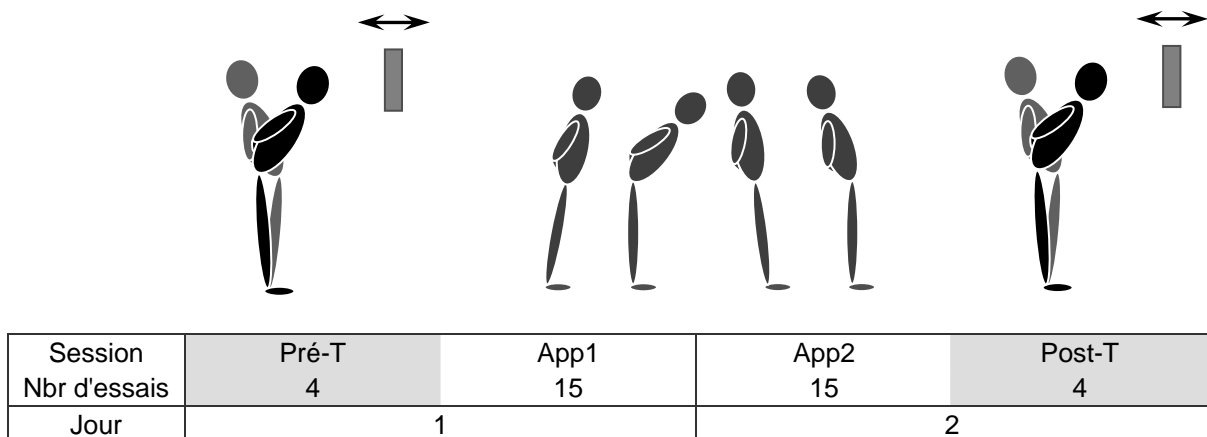


Figure 2.4. Protocole suivi par les participants du groupe expérimental (expérimentation 1). Partie supérieure : Tâches lors des sessions de test (pré-test et post-test) et d'apprentissage. Partie inférieure : Organisation des sessions expérimentales (Pré-T : pré-test ; App1 : session d'apprentissage du premier jour ; App2 : session d'apprentissage du deuxième jour ; Post-T : post-test), et nombre d'essai par session sur les deux jours de pratique.

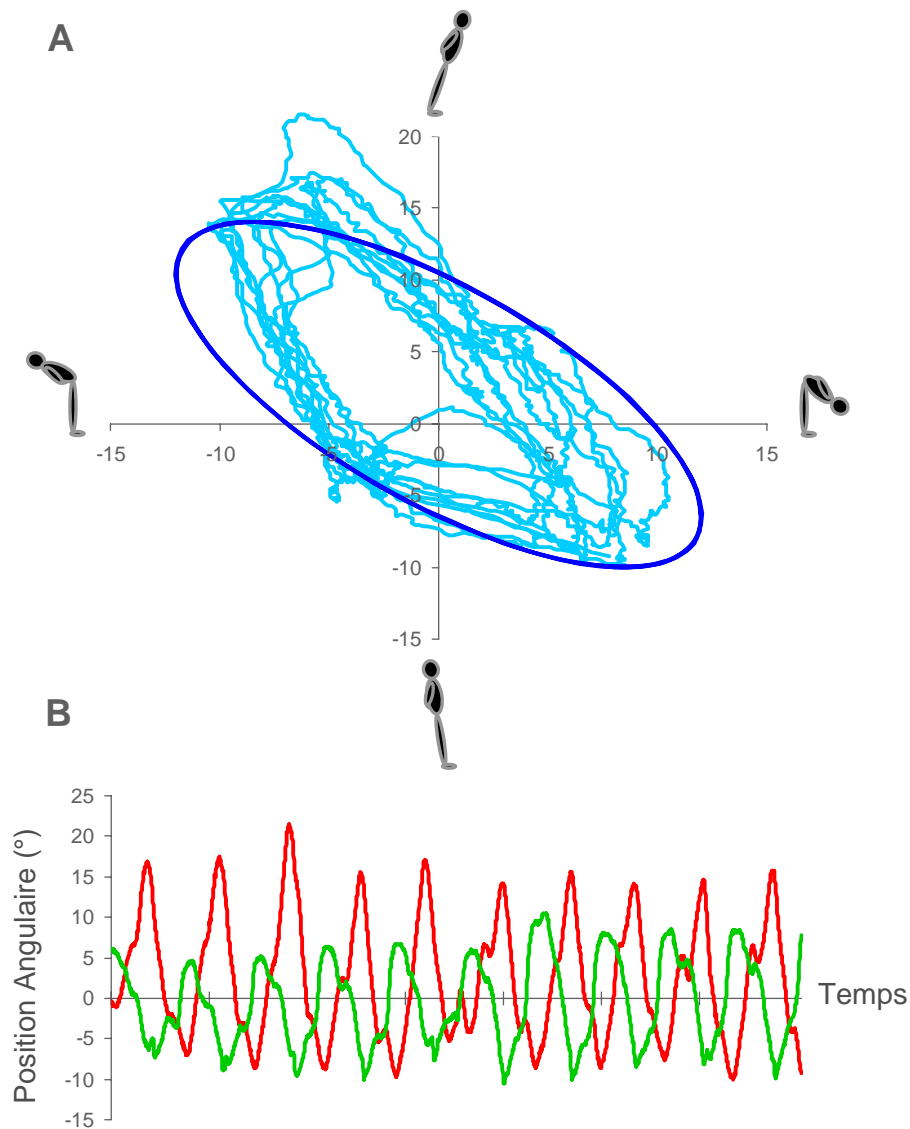


Figure 2.5. Connaissance du résultat donnée aux participants tous les trois essais. Les données correspondent au 21<sup>ème</sup> essai d'apprentissage d'un des participants. A : position angulaire des chevilles en fonction de la position angulaire des hanches (i.e., espace hanche-cheville ou figure de Lissajous). L'ellipse tracée en bleu foncé correspond à la forme que le participant doit chercher à reproduire. La courbe bleu ciel correspond aux mouvements effectifs réalisés par le participant. B : évolution de la position angulaire des hanches et des chevilles en fonction du temps. Un déplacement vers le haut correspond à un mouvement de flexion, et vers le bas, à une extension. Le mouvement est représenté en vert pour les chevilles et en rouge pour les hanches.

*Groupe contrôle.*

Les participants du groupe contrôle sont testés sur un seul jour. Ils réalisent la même tâche de poursuite de cible que les participants du groupe expérimental lors des sessions de test. Après avoir sélectionné la fréquence de cible appropriée, ils effectuent le même nombre d'oscillations que le groupe expérimental sur un jour (répétitions d'apprentissage plus session de test), soit 19 essais. Ces essais sont réalisés sur la tâche de poursuite de cible uniquement. Comme pour le groupe expérimental, des temps de pause sont effectués tous les trois essais. La mise en place du groupe contrôle a pour but de vérifier que les effets éventuellement observés sur les coordinations spontanées pour le groupe expérimental, sont dus à l'apprentissage et non à la fatigue.

**2.2.1.4. Variables dépendantes**

Les données des électro-goniomètres sur les déplacements angulaires des hanches et des chevilles sont filtrées grâce à un filtre passe-bas, afin de soustraire le bruit au signal. Pour cela, après avoir effectué une transformée de Fourier rapide (FFT), le signal dans le domaine fréquentiel est coupé à 2 Hz puis reconstruit dans le domaine temporel. Le premier cycle de chaque essai n'est pas pris en compte dans les analyses car il peut présenter des particularités dues à la "mise en route". En particulier, pour les essais sur la tâche de poursuite de cible, les participants peuvent être surpris par l'apparition de la cible et mettre quelques centaines de millisecondes pour s'ajuster aux mouvements de celle-ci.

Pour le pré-test et le post-test (ainsi que pour tous les essais du groupe contrôle), deux variables dépendantes sont calculées : la phase relative,  $\phi_{rel}$ , entre les mouvements des hanches et des chevilles, et son écart-type,  $ET\phi_{rel}$ . La phase relative hanche-cheville correspond à la variable collective qui permet de caractériser le mode de coordination produit. Elle est calculée de façon ponctuelle, à partir du pic de flexion des articulations pour chaque cycle de mouvement. Une phase relative comprise entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  signifie que les chevilles sont en avance par rapport aux hanches. L'écart-type de la phase relative est un indicateur de la stabilité de la coordination. Il est calculé pour chaque essai à partir des valeurs de phase relative par cycle. Pour la session d'apprentissage,  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$  sont également calculés, ainsi que deux variables dépendantes supplémentaires : l'erreur absolue,  $EA$ , et le temps de mouvement nécessaire pour réaliser les 10 cycles de chaque essai,  $TM$ . L'erreur absolue  $EA$  traduit la distance entre le patron produit et le patron requis.

Elle correspond à la valeur absolue de la différence entre la phase relative produite ( $\phi_{rel}$ ) et la phase relative à produire ( $135^\circ$ ). Afin de comparer le patron de coordination effectué à différent moment de la pratique, les données sont groupées par bloc de quatre essais pour le début (essais 1 à 4), le milieu (essais 14 à 17) et la fin de la pratique (essais 27 à 30).

La phase relative et les variables qui en sont dérivées ( $ET\phi_{rel}$  et  $EA$ ) étant des variables circulaires, les mesures de tendance centrale et de dispersion sont calculées grâce à des statistiques circulaires (Batschelet, 1981). Des tests de non uniformité de Rayleigh menés sur  $\phi_{rel}$  permettent de déterminer le caractère directionnel de la distribution, c'est-à-dire, si les données sont dirigées vers une direction préférée. Des tests de Watson-Williams sont utilisés pour comparer les valeurs de  $\phi_{rel}$  dans les différentes conditions. Lorsque c'est utile (présence de plusieurs niveaux pour un même facteur ou de plusieurs facteurs), des ANOVAs sont réalisées sur  $ET\phi_{rel}$ ,  $EA$  et  $TM$  (variable linéaire). Afin de mettre au jour d'éventuelles différences individuelles, les analyses statistiques sont menées par groupe de participants, mais également par participant. Cela nous permet d'évaluer si les tendances générales observées traduisent de façon fidèle les comportements individuels.

### 2.2.2. Résultats

Les principaux objectifs de cette expérimentation étaient, d'une part, de déterminer comment était appris un patron hanche-cheville non spontané ( $\phi_{rel} = 135^\circ$ ), et d'autre part, d'analyser les effets de cet apprentissage sur la valeur de phase relative et la stabilité du patron de coordination émergeant lors de la tâche supra-posturale. Dans un premier temps, nous analyserons les modes spontanés initiaux adoptés par les participants lors du pré-test. Nous nous intéresserons ensuite à l'évolution du patron de coordination produit au cours des trente essais de la session d'apprentissage. Pour finir, les essais du post-test seront comparés à ceux du pré-test afin d'examiner les conséquences de l'apprentissage de la phase relative de  $135^\circ$  sur les patrons spontanés. Notons que sur l'ensemble de l'expérimentation (i.e., tous les essais de tous les participants), seul trois essais ont été repris à cause du soulèvement du talon ou des orteils.

### 2.2.2.1. Coordinations spontanées lors du pré-test

Les tests de non uniformité de Rayleigh effectués sur la phase relative révèlent que sur les vingt quatre participants, vingt présentent une distribution directionnelle, c'est à dire concentrée autour de la phase relative moyenne ( $p < .05$ ). L'absence de patron spontané initial stable nous interdit de futures analyses sur la modification du patron intrinsèque pour les quatre participants concernés. Ceux-ci sont donc exclus des analyses, ce qui mène à 14 participants dans le groupe expérimental et 6 dans le groupe contrôle.

Le calcul des phases relatives moyennes individuelles révèle que 13 des 14 participants du groupe expérimental produisent un patron de coordination stable autour de l'anti-phase. Pour ce groupe de 13 participants, la phase relative hanche-cheville moyenne est de  $178.56^\circ$ , et son écart-type de  $40.82^\circ$ . L'intervalle de confiance à 95% contient  $180^\circ$  ( $173.48^\circ < \phi_{rel} < 183.64^\circ$ ). Le quatorzième participant produit une coordination proche de la phase ( $\phi_{rel} = -35^\circ$ ). Les résultats du groupe contrôle révèlent l'émergence d'une phase relative hanche-cheville proche de l'anti-phase pour les 6 participants. Les moyennes du groupe contrôle sont de  $174.36^\circ$  pour  $\phi_{rel}$ , et  $50.70^\circ$  pour  $ET\phi_{rel}$ , l'intervalle de confiance à 95% contenant toujours  $180^\circ$  ( $164.79^\circ < \phi_{rel} < 183.94^\circ$ ). Un test de Watson-Williams mené sur  $\phi_{rel}$  montre que le patron de coordination spontané produit ne diffère pas de façon significative entre les participants du groupe expérimental en anti-phase et le groupe contrôle,  $F(1, 640) < 1$ , *ns*.

### 2.2.2.2. Session d'apprentissage

Les trente essais de pratique de la session d'apprentissage permettent la réalisation d'un nouveau patron de coordination (i.e., non spontané) pour 12 des 14 participants du groupe expérimental. En effet, à la fin de la session d'apprentissage, seuls deux participants adoptent un patron qui n'est pas différent de ce qu'ils produisaient initialement au pré-test. Pour ces deux participants, des tests de Watson-Williams réalisés sur  $\phi_{rel}$  ne révèlent pas de différence significative entre le pré-test ( $M = 173.83^\circ$ ) et les quatre derniers essais de la période d'apprentissage ( $M = 183.22^\circ$ ),  $F(1, 141) < 1$ , *ns*, ainsi qu'entre les quatre premiers ( $M = 190.67^\circ$ ) et les quatre derniers essais d'apprentissage ( $M = 183.22^\circ$ ),  $F(1, 157) < 1$ , *ns*. Ces deux participants n'ont donc pas appris à produire le nouveau mode de coordination. Lorsque les analyses sont relatives aux conséquences de l'apprentissage, ils



sont logiquement exclus des analyses. Le groupe alors obtenu (12 participants ayant appris) est appelé groupe apprentissage.

La Figure 2.6. présente l'évolution des valeurs moyennes de la phase relative, de son écart-type et du temps de mouvement, au cours de la pratique pour le groupe apprentissage. L'amélioration de ces trois caractéristiques du patron produit avec l'augmentation de la quantité de pratique est détaillée ci-après.



Figure 2.6. Résultats moyens pour le groupe apprentissage. Evolution (A) de la phase relative produite,  $\phi_{rel}$ , (B) de l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , et (C) du temps de mouvement,  $TM$ , avec les essais de pratique.

*Evolution de la précision.*

Au cours de la pratique, la phase relative produite se rapproche progressivement de la valeur requise de  $135^\circ$  (Figure 2.6.A). Pour le groupe apprentissage, les valeurs moyennes passent de  $157.38^\circ$  lors des quatre premiers essais, à  $142.36^\circ$  lors des quatre essais médians, pour finir à  $138.16^\circ$  lors des quatre derniers essais de la session d'apprentissage. Des tests de Watson-Williams révèlent une différence significative de la phase relative produite entre le début (essais 1-4) et le milieu de la pratique (essais 14-17),  $F(1, 962) = 23.08, p < .05$ , ainsi qu'entre le début et la fin de la pratique (essais 27-30),  $F(1, 946) = 51.41, p < .05$ . La différence entre le milieu et la fin de la pratique n'est pas significative,  $F(1, 946) = 2.86, ns$ . Une ANOVA avec mesures répétées réalisée sur l'erreur absolue confirme l'amélioration de la précision pour le groupe apprentissage entre le début ( $M = 30.46^\circ$ ), le milieu ( $M = 22.70^\circ$ ) et la fin de la pratique ( $M = 17.84^\circ$ ),  $F(2, 22) = 4.35, p < .05$ . Un test de Watson-Williams montre également que la phase relative produite à la fin de la session d'apprentissage diffère significativement du patron spontanément produit lors du pré-test,  $F(1, 770) = 171.09, p < .05$ , ce qui indique que le patron appris est différent du patron préexistant.

La Figure 2.7. présente la fréquence d'apparition des différents modes de coordination (en proportion du nombre total de cycle) lors du début, du milieu et de la fin de la session d'apprentissage. Au début de la pratique (essais 1-4), une attraction vers le mode spontané de  $180^\circ$  est révélée par une fréquence d'apparition prédominante des phases relatives autour du mode en anti-phase (intervalle  $]172.5^\circ ; 187.5^\circ]$ , centre d'intervalle de  $180^\circ$ ). Au milieu de la période d'apprentissage (essais 14-17), deux pics de fréquence sont présents autour de  $180^\circ$  (intervalle  $]172.5^\circ ; 187.5^\circ]$ ) et  $135^\circ$  (intervalles  $]112.5^\circ ; 127.5^\circ]$ ,  $]127.5^\circ ; 142.5^\circ]$ , et  $]142.5^\circ ; 157.5^\circ]$ ). A la fin de l'apprentissage (essais 27-30), l'intervalle de phase relative le plus fréquemment produit est de loin  $]127.5^\circ ; 142.5^\circ]$ , centré autour de la phase relative à apprendre de  $135^\circ$ . Le changement de fréquence d'apparition des différents patrons entre le début et la fin de l'apprentissage est démontré statistiquement,  $\chi^2(23, N = 12) = 396.87, p < .05$ . Ces résultats montrent qu'avec la pratique, l'attraction du mode spontané en anti-phase est surmontée, ce qui permet d'atteindre la phase relative requise de  $135^\circ$ .

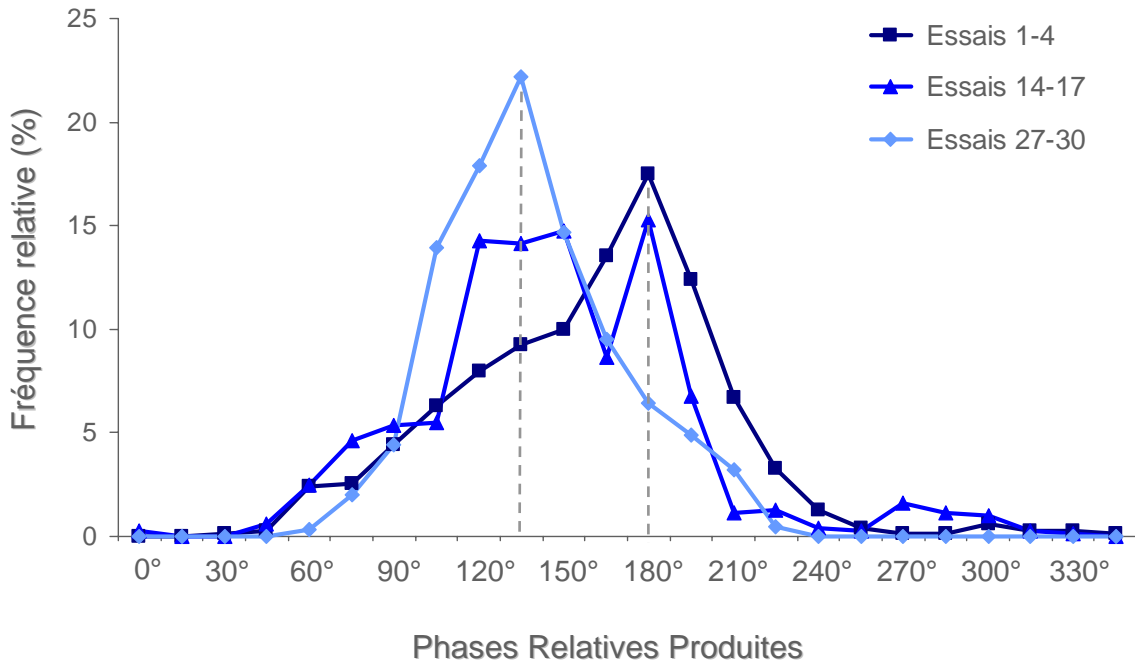


Figure 2.7. Fréquence d'apparition des différentes phases relatives groupées par intervalle de 15° ( $] -7.5^\circ ; 7.5^\circ ]$  ;  $] 7.5^\circ ; 22.5^\circ ]$  ;  $] 22.5^\circ ; 37.5^\circ ]$ ...) au début (essais 1-4), au milieu (essais 14-17) et à la fin de la session d'apprentissage (essais 27-30). Les étiquettes de l'axe des abscisses dénomment un centre d'intervalle sur deux. Les traits en pointillés indiquent les centres des deux intervalles les plus fréquemment produits selon la période d'apprentissage, à savoir l'anti-phase ( $\phi_{rel} = 180^\circ$ ) et le patron à apprendre ( $\phi_{rel} = 135^\circ$ ).

#### Evolution de la stabilité.

La Figure 2.6.B montre la diminution progressive de l'écart-type moyen de la phase relative (i.e., l'augmentation de stabilité du patron produit) pour les 12 participants du groupe apprentissage. Les valeurs sont de  $26.95^\circ$ ,  $24.87^\circ$ , et  $16.94^\circ$ , pour les essais 1-4, 14-17, et 27-30, respectivement. Des tests de Watson-Williams confirment la significativité de cette diminution entre le début (essais 1-4) et la fin de la pratique (essais 27-30),  $F(1, 94) = 13.12$ ,  $p < .05$ , ainsi qu'entre le milieu (essais 14-17) et la fin de la pratique,  $F(1, 94) = 9.57$ ,  $p < .05$ . La différence de stabilité entre le début et le milieu de la pratique n'est pas significative,  $F(1, 94) < 1$ , *ns*. Une ANOVA avec mesures répétées (début, milieu, fin)

donne des résultats similaires,  $F(2,22) = 3.39$ ,  $p = .05$ . Ces résultats indiquent donc une amélioration de la stabilité de la coordination produite avec la pratique.

*Evolution du temps de mouvement.*

Aucune instruction n'est donnée aux participants sur la vitesse d'exécution des 10 cycles de chaque essai. Néanmoins, cette variable peut constituer un indicateur de la facilité à produire le mode de  $135^\circ$ . La Figure 2.6.C, montre l'évolution du temps de mouvement avec les essais de pratique. Comme pour  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$ , le temps de mouvement diminue au cours de la session d'apprentissage. Les valeurs moyennes de temps de mouvement pour le groupe apprentissage sont de 61.23 s ( $ET = 20.40$  s), soit 0.19 Hz lors des quatre premiers essais, 50.25 s ( $ET = 15.75$  s) soit 0.20 Hz pour les quatre essais médians, et 47.76 s ( $ET = 12.50$  s) soit 0.21 Hz pour les quatre derniers essais de la session d'apprentissage. Une ANOVA avec mesures répétées montre que la diminution du temps de mouvement entre ces périodes est significative,  $F(2, 22) = 13.16$ ,  $p < .05$ .

*Différences individuelles sur l'apprentissage.*

Derrière les tendances générales que nous venons de décrire, les analyses individuelles révèlent des comportements différenciés selon les participants. Afin d'examiner si la session d'apprentissage mène à des progressions identiques du patron de coordination, nous analysons les changements de la phase relative produite et de son écart-type pour chaque participant. Le Tableau 2.1. présente les différents comportements identifiés sur la base de la significativité des différences entre le début et la fin de la période de pratique. Pour quatre participants (groupe précision), l'apprentissage se caractérise par une amélioration de la précision, sans changement de stabilité entre les premiers et les derniers essais de pratique. Le patron produit, en anti-phase lors des essais 1 à 4, évolue progressivement vers le patron à apprendre au cours des essais. Cette augmentation de la précision s'accompagne d'une augmentation de la variabilité au milieu de la période de pratique, avant de revenir à sa valeur initiale lors des derniers essais. Pour trois participants (groupe stabilité), au contraire, l'apprentissage se traduit par une diminution de la variabilité, sans changement significatif de la phase relative produite entre les premiers et les derniers essais. Un troisième groupe, constitué de deux participants (groupe mixte), présente des changements à la fois pour la précision et la stabilité. Trois participants (groupe immédiat) produisent un patron de coordination proche du patron à

apprendre dès le début de la pratique, sans qu'il y ait de changement significatif de précision par la suite. Bien qu'il y ait une tendance à la diminution de la variabilité du patron produit, le changement n'est pas significatif. Pour finir, deux participants (qui ne faisaient pas partie du groupe apprentissage) n'ont pas appris à produire le patron de coordination de 135°. Ces différentes évolutions de la précision et de la stabilité selon les participants révèlent que des chemins différents peuvent être empruntés avant d'atteindre, en fin d'apprentissage des patrons aux caractéristiques de précision et de stabilité comparables.

Tableau 2.1. Différences individuelles concernant l'évolution de la précision ( $\phi_{rel}$ ) et de la stabilité ( $ET\phi_{rel}$ ) au cours de la pratique.

Sous-groupe	Essais 1-4		Essais 14-17		Essais 27-30	
	$\phi_{rel}$ (°)	$ET\phi_{rel}$ (°)	$\phi_{rel}$ (°)	$ET\phi_{rel}$ (°)	$\phi_{rel}$ (°)	$ET\phi_{rel}$ (°)
Groupe Précision (N = 4)	178.85	17.97	154.26	32.32	143.86	18.73
Groupe Stabilité (N = 3)	135.29	33.13	152.55	16.95	142.12	13.47
Groupe Mixte (N = 2)	176.99	35.42	133.41	27.68	120.81	15.82
Groupe Immédiat (N = 3)	130.52	28.07	125.56	21.46	138.18	19.02
Groupe Non Apprentissage (N = 2)	190.70	36.91	167.98	32.05	184.18	28.34

La Figure 2.8. représente les diagrammes de fréquence circulaires pour quatre participants représentatifs des groupes précision, stabilité, mixte et immédiat. Les fréquences d'apparition sont calculées par intervalle de phase relative de 10°, et en pourcentage du nombre d'occurrence total. Les cercles concentriques correspondent à une graduation de la fréquence relative tous les 10 % (10 % de fréquence d'apparition pour le plus petit cercle et 30 % pour le plus grand). Le segment de droite partant de l'origine du diagramme et se terminant par un arc de cercle de taille variable représente la moyenne des phases relatives produites. L'arc de cercle représente l'intervalle de confiance à 95%.

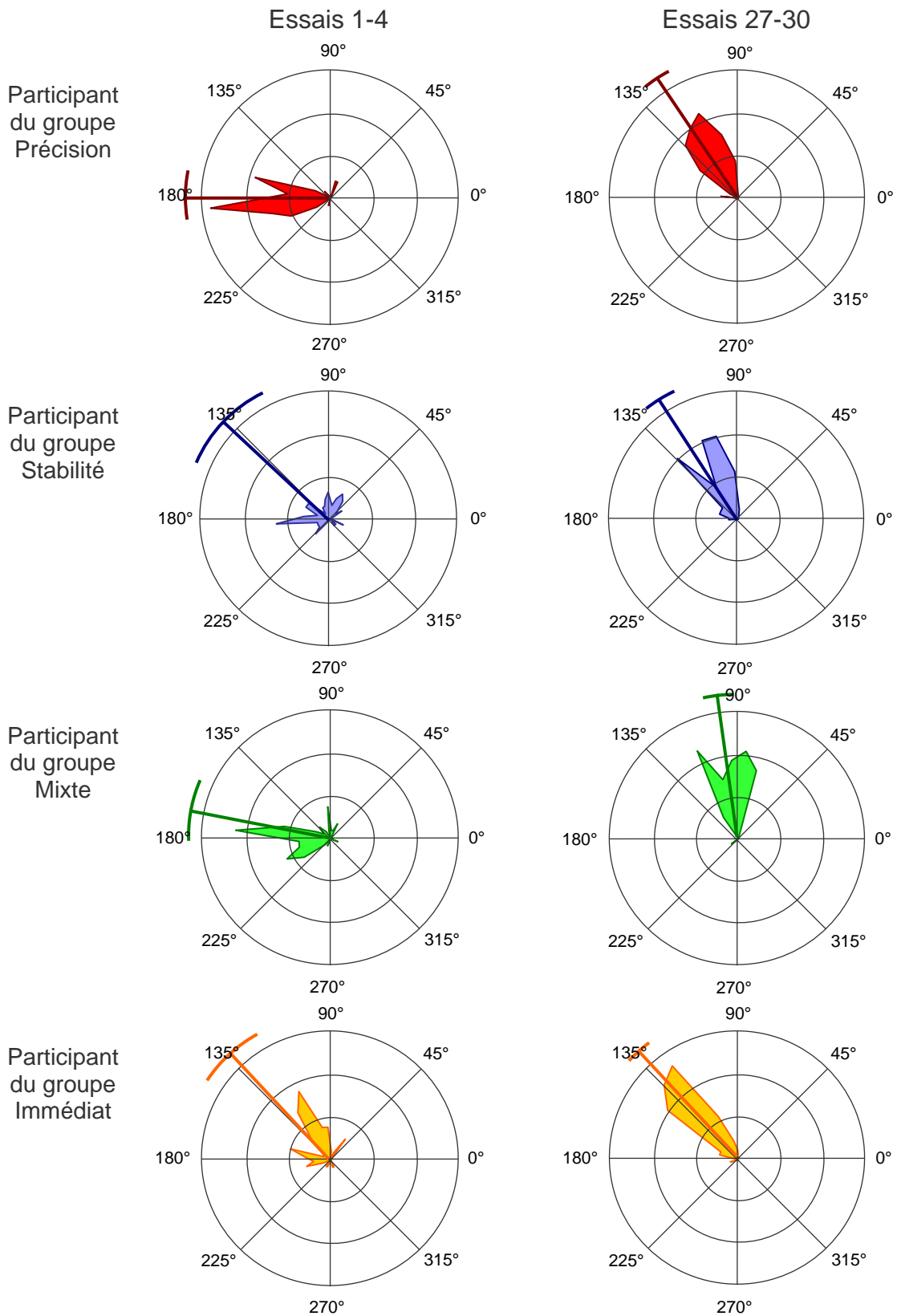


Figure 2.8. Diagrammes circulaires de fréquence relative au début et à la fin de la session de pratique pour quatre participants représentatifs. Voir le texte.

### 2.2.2.3. Conséquences de l'apprentissage sur les patrons spontanés

Afin d'analyser si les patrons de coordination spontanés sont modifiés par l'apprentissage du patron de  $135^\circ$ , nous comparons la phase relative hanche-cheville produite et sa stabilité lors du pré-test et du post-test. Le groupe contrôle produit le même nombre d'oscillations que le groupe expérimental sur un jour, mais toujours avec la tâche de poursuite de cible. Les tests de Watson-Williams ne montrent pas de différence entre les quatre premiers ( $\phi_{rel} = 174.36^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 50.70^\circ$ ) et les quatre derniers essais pour le groupe contrôle ( $\phi_{rel} = 171.34^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 55.49^\circ$ ), que ce soit pour la phase relative,  $F(1, 394) < 1$ , *ns*, ou pour son écart-type,  $F(1, 46) = 1.26$ , *ns*. L'absence de modification significative entre le début et la fin de la session expérimentale pour ce groupe permet de s'assurer que les éventuels changements observés pour le groupe expérimental peuvent être attribués à la pratique de la phase relative de  $135^\circ$ .

#### *Données du groupe.*

Lors de l'analyse du pré-test, nous avons constaté que 13 des 14 participants du groupe expérimental présentaient une coordination proche de l'anti-phase ( $\phi_{rel} \approx 180^\circ$ ). Le quatorzième participant réalise une coordination hanche-cheville voisine d'un mode en phase ( $\phi_{rel} \approx -35^\circ$ ), pratiquement à l'opposé des autres participants. Il ne peut donc être inclus dans les analyses suivantes sans induire de biais. D'autre part, comme nous l'avons indiqué précédemment, deux participants n'ont pas appris la phase relative demandée. Etant donné que nous cherchons à évaluer les conséquences de l'apprentissage, ils sont considérés de façon séparée dans les analyses suivantes.

Pour le groupe de 11 participants qui présentent une coordination en anti-phase lors du pré-test et qui ont appris le patron de  $135^\circ$ , un test de Watson-Williams montre que la phase relative spontanée est significativement modifiée entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 179.36^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 162.11^\circ$ ),  $F(1, 764) = 11.11$ ,  $p < .05$ . L'intervalle de confiance à 95% autour de  $\phi_{rel}$  contient  $180^\circ$  lors du pré-test ( $173.98^\circ < \phi_{rel} < 184.74^\circ$ ) mais pas lors du post-test ( $151.89^\circ < \phi_{rel} < 172.33^\circ$ ). Ces résultats indiquent un déplacement de la phase relative produite par rapport à la coordination initiale en pure anti-phase. Concernant l'écart-type de la phase relative, le test de Watson-Williams montre également une différence significative entre le pré-test ( $ET\phi_{rel} = 39.95^\circ$ ) et le post-test ( $ET\phi_{rel} = 49.83^\circ$ ),

$F(1, 86) = 5.66, p < .05$ , dans le sens d'une diminution de la stabilité du patron spontané. Ces résultats montrent que l'apprentissage de la phase relative de  $135^\circ$  a induit une modification du patron spontané initialement en anti-phase. Comme nous pouvions l'attendre, les deux participants n'ayant pas appris le nouveau mode de coordination ne présentent pas de modification du patron spontané entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 173.29^\circ, ET\phi_{rel} = 45.55^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 193.78^\circ, ET\phi_{rel} = 56.79^\circ$ ),  $F_s < 2.13, ns$ . Cette absence de différence significative pour ces participants corrobore les résultats obtenus pour le groupe contrôle : les modifications du patron spontané observées pour le groupe apprentissage sont bien la conséquence de l'acquisition du nouveau mode de coordination.

*Différences individuelles sur la modification du patron spontané.*

Comme pour les données relatives à l'apprentissage que nous avons décrites plus haut, les moyennes par groupe masquent des comportements différenciés selon les participants. Les tendances générales du groupe de participants indiquent à la fois une dérive de la phase relative produite par rapport au mode initial en anti-phase et une augmentation de son écart-type. Les analyses individuelles révèlent que le patron spontané des participants après apprentissage, est modifié soit au niveau du mode de coordination produit, soit sur sa stabilité, soit pas du tout. Ainsi sur les 12 participants du groupe apprentissage, trois types de comportement peuvent être distingués (Figure 2.9.).

Entre le pré-test et le post-test, pour cinq participants, le mode de coordination émergent change en direction du patron appris, et même au-delà, sans que la stabilité soit modifiée (Figure 2.9.A). Le participant qui présentait une coordination proche de la phase au pré-test fait partie de ce sous groupe. Ses données ne sont pas incluses dans la Figure 2.9. Des tests de Watson-Williams montrent que la phase relative produite par ce participant diffère significativement entre le pré-test ( $\phi_{rel} = -34.84^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 110.78^\circ$ ),  $F(1, 62) = 15.41, p < .05$ , et que l'écart-type de la phase relative n'est pas modifié (moyenne de  $58.97^\circ$  et de  $54.49^\circ$  pour le pré-test et le post-test, respectivement),  $F(1, 6) < 1, ns$ . De la même façon, pour les quatre autres participants de ce sous-groupe, la phase relative moyenne est significativement modifiée entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 165.04^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 82.26^\circ$ ),  $F(1, 289) = 44.03, p < .05$ . Par contre,  $ET\phi_{rel}$  est inchangé, avec des valeurs moyennes de  $55.71^\circ$  au pré-test et  $59.58^\circ$  au post-test,  $F(1, 30) < 1, ns$ .



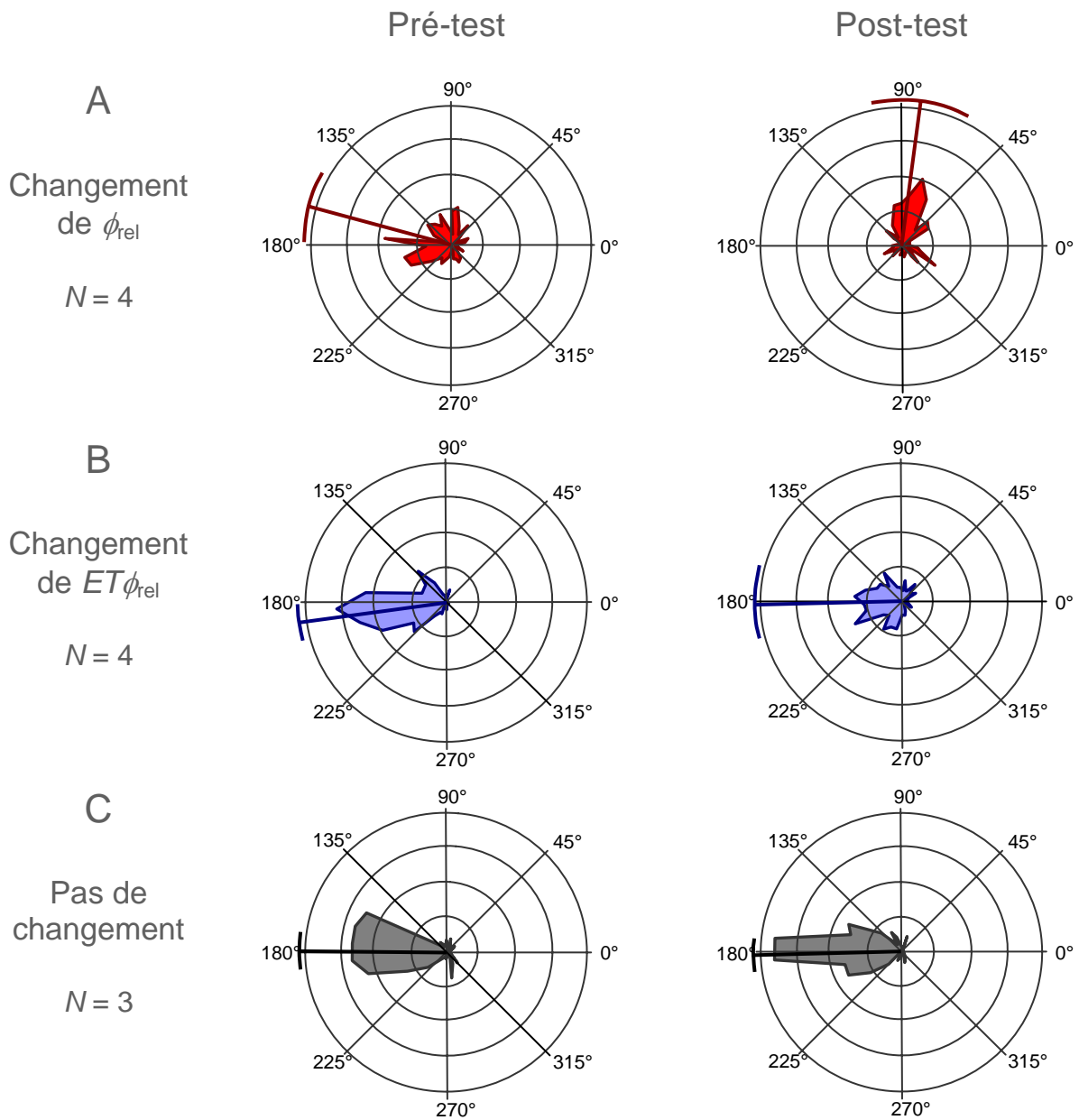


Figure 2.9. Diagrammes circulaires de la fréquence d'apparition des phases relatives montrant les différents changements du patron spontané entre le pré-test (à gauche) et le post-test (à droite). Les fréquences d'apparition sont calculées par intervalle de phase relative de  $10^\circ$ , et en pourcentage du nombre d'occurrence total. Les cercles concentriques correspondent à une graduation de la fréquence relative tous les 5 % (5 % de fréquence d'apparition pour le plus petit cercle et 20 % pour le plus grand). Le segment de droite et l'arc de cercle indiquent respectivement, la direction moyenne des phases relatives, et son intervalle de confiance à 95%. A : Données des 4 participants présentant un changement des valeurs de phase relative sans modification de la variabilité. B : Données des 4 participants présentant un changement de l'écart-type de la phase relative sans modification de la phase relative moyenne. C : Données des 3 participants ne présentant pas de modification de la phase relative produite et de son écart-type après apprentissage.

Pour le deuxième sous-groupe, constitué de quatre participants, la modification du patron spontané n'est plus relative à la valeur de la phase relative produite mais à sa stabilité (Figure 2.9.B). Les valeurs moyennes de phase relative pour ce sous-groupe sont inchangées entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 188.01^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 180.85^\circ$ ),  $F(1, 270) < 1$ , *ns*. L'écart-type de la phase relative diffère significativement,  $F(1, 30) = 28.95$ ,  $p < .05$ , avec des valeurs moyennes de  $31.63^\circ$  lors du pré-test et de  $56.63^\circ$  lors du post-test.

Finalement, bien qu'ils aient appris le nouveau mode de coordination, trois participants ne changent pas de patron spontané entre le pré-test et le post-test (Figure 2.9.C). Pour ce dernier sous-groupe, la phase relative moyenne est de  $179.17^\circ$  pour le pré-test et de  $181.19^\circ$  pour le post-test ( $F(1, 201) < 1$ , *ns*). Concernant l'écart-type de la phase relative, la valeur moyenne est de  $29.70^\circ$  au pré-test et de  $27.09^\circ$  au post-test ( $F(1, 22) < 1$ , *ns*).

Ainsi, les comparaisons pré-test vs. post-test montrent que pour 9 des 12 participants du groupe apprentissage, le patron de coordination hanche-cheville est modifié suite à l'apprentissage de la phase relative de  $135^\circ$ . Pour certains, cette modification se traduit par un changement de la phase relative produite en direction du patron appris, alors que pour d'autres, il s'agit d'une perte de stabilité du mode spontané initial. Aucune relation entre le type de déstabilisation et la fréquence préférée d'oscillation lors de la tâche de poursuite de cible (identifiée avant le pré-test) ne peut être établie. En effet, pour les participants présentant une modification de la phase relative spontanée ( $N = 5$ ), les fréquences d'oscillation choisies étaient de 0.35 Hz, 0.45 Hz (pour deux participants), 0.55 Hz et 0.65 Hz. Pour les participants présentant une perte de stabilité du mode de coordination spontané ( $N = 4$ ), les fréquences d'oscillation choisies étaient de 0.25 Hz, 0.35 Hz, 0.55 Hz et 0.65 Hz. Enfin, pour les participants ne présentant pas de différence entre le pré-test et le post-test ( $N = 3$ ), les fréquences d'oscillation choisies étaient de 0.25 Hz, 0.55 Hz et 0.65 Hz. Le mode de coordination adopté, sa stabilité, et leur modification avec l'apprentissage ne semblent donc pas être dépendants de la fréquence de mouvement.

Par contre, il est intéressant de remarquer que la nature de la modification du patron spontané dépend de la stabilité initiale observée au pré-test. La Figure 2.9. montre que les participants modifiant  $\phi_{rel}$  sont ceux qui sont les plus instables initialement (partie gauche

de la Figure 2.9.A, distribution de fréquence relativement uniforme), avec  $ET\phi_{rel} = 55.71^\circ$  lors du pré-test. Les participants modifiant  $ET\phi_{rel}$  sont plus stables au départ (partie gauche de la Figure 2.9.B, distribution de fréquence très orientée), avec  $ET\phi_{rel} = 31.63^\circ$  lors du pré-test. Le fait que la nature de la modification du patron spontané ( $\phi_{rel}$  vs.  $ET\phi_{rel}$ ) peut être prédite par la stabilité du patron au pré-test est confirmé statistiquement par deux analyses. Pour les participants du groupe apprentissage qui présentent une coordination en anti-phase au pré-test, une corrélation positive significative est trouvée entre la valeur de  $ET\phi_{rel}$  au pré-test et la différence de  $\phi_{rel}$  entre le pré-test et le post-test,  $r(9) = 0.74, p < .05$  : plus  $ET\phi_{rel}$  est important au pré-test (i.e., plus les participants sont instable initialement), plus la différence de phase relative est importante entre le pré-test et le post-test. De plus, pour le groupe apprentissage, une corrélation négative significative est trouvée entre la valeur de  $ET\phi_{rel}$  au pré-test et la différence de  $ET\phi_{rel}$  entre le pré-test et le post-test,  $r(10) = -0.56, p < .05$  : les participants les plus stables initialement sont ceux qui présentent la variation de  $ET\phi_{rel}$  la plus importante entre le pré-test et le post-test. En conclusion, les participants les plus stables ont tendance à perdre la stabilité du mode de coordination spontané après l'apprentissage alors que les participants les moins stables ont tendance à changer de mode spontané en direction du patron appris.

Pour finir, pour l'ensemble du groupe expérimental, on ne trouve pas de relation entre la stabilité initiale au pré-test et les indicateurs de performance ( $EA, ET\phi_{rel}, TM$ ) sur la tâche à apprendre, que ce soit au début (essais 1-4),  $r(12) < -.22, ns$ , ou à la fin de la période d'apprentissage (essais 27-30),  $r(12) < -.15, ns$ . Autrement dit, la facilité à produire ou à apprendre le mode de  $135^\circ$  n'est pas influencée par la stabilité initiale du patron spontané.

## 2.3. Expérimentation 2

Dans l'expérimentation 1, la plupart des participants ont appris à produire le patron de coordination de  $135^\circ$  entre les hanches et les chevilles (12 participants sur 14), et présentent une modification du patron spontané ou de sa stabilité en conséquence de cet apprentissage (9 participants sur 12). D'importantes différences individuelles sont observées, aussi bien au cours de la pratique, sur l'évolution du patron appris, que sur la nature du changement observé pour le patron spontané. Dans l'expérimentation 1, nous nous sommes centrés sur le patron spontané en anti-phase. Dans l'expérimentation 2, nous analysons les conséquences de l'apprentissage de la phase relative de  $135^\circ$  pour les deux modes préexistants : en phase et en anti-phase. Dans les études menées sur les coordinations bi-manuelles, les phénomènes de déstabilisation des patrons intrinsèques sont généralement observés sur le patron en anti-phase, l'apprentissage n'affectant pas le patron en phase. L'expérimentation 2 a pour but d'évaluer si l'apprentissage du patron de  $135^\circ$  a des conséquences différentes sur les patrons spontanés en phase et en anti-phase. Pour faire émerger l'un ou l'autre mode, nous utilisons deux fréquences de cible lors des sessions de test de la coordination spontanée, à savoir 0.25 Hz et 0.65 Hz. Ces fréquences ont été identifiées précédemment comme faisant émerger de façon préférentielle l'un ou l'autre mode (e.g., Bardy et al., 2002), 0.25 Hz favorisant une coordination hanche-cheville en phase et 0.65 Hz, une coordination en anti-phase.

L'amplitude des mouvements de la tête est mesurée lors de la tâche supra-posturale, afin d'analyser si l'amplitude des mouvements de la cible est respectée, et si elle diffère selon les modes de coordination hanche-cheville observés. D'autre part, le nombre d'essais d'apprentissage est élevé à 50, et des tests intermédiaires sont mis en place afin d'étudier l'évolution de la coordination spontanée avec la quantité de pratique. Pour finir, un test de rétention mené une semaine après la pratique permet d'évaluer la persistance de la performance du patron appris ainsi que des éventuelles modifications du patron spontané induites par l'apprentissage.

### 2.3.1. Méthode

#### **2.3.1.1. Participants**

Vingt quatre participants masculins, étudiants à l'Université de Paris Sud 11 participent à l'expérimentation de façon bénévole. Tous les participants présentent une vision normale ou corrigée et sont naïfs par rapport aux objectifs de l'expérimentation. Aucun ne rapporte de trouble de l'équilibre. Ils prennent part pour la première fois à une expérimentation sur les coordinations posturales (aucun participant de l'expérimentation 1 n'effectue cette deuxième expérimentation). Dix-sept participants composent le groupe expérimental. Ils sont âgés de 20 à 27 ans ( $M = 22.59$ ,  $ET = 2.03$ ), ont une taille moyenne de 173.88 cm ( $ET = 4.65$ ), et un poids moyen de 69.18 kg ( $ET = 4.25$ ). Le groupe contrôle comprend sept participants, âgés de 20 à 29 ans ( $M = 23.14$ ,  $ET = 3.08$ ). Leur taille moyenne est de 180.14 cm ( $ET = 5.81$ ), et leur poids moyens de 73.29 kg ( $ET = 9.07$ ).

#### **2.3.1.2. Tâches et Dispositif expérimental**

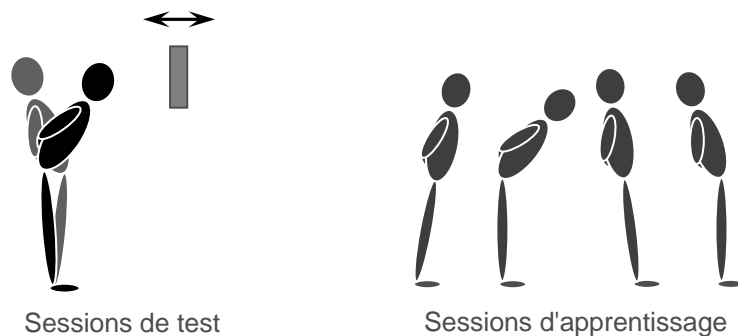
Les tâches et le dispositif expérimental sont identiques à l'expérimentation 1, à la fois pour les sessions de test du patron spontané (tâche de poursuite de cible, Figure 2.2.) et pour la session d'apprentissage (phase relative à apprendre de  $135^\circ$ , Figure 2.3.). Seuls deux changements sont apportés au dispositif de l'expérimentation 1 pour les sessions de tests. Tout d'abord, les déplacements de la tête sont enregistrés à une fréquence de 50 Hz grâce à un système d'acquisition électromagnétique (Flock of Birds, Ascension Technologies, Inc., Burlington, VT). Les participants portent un serre-tête sur lequel est fixé le récepteur de ce système, de façon à ce que celui-ci soit placé au sommet de la tête du participant. D'autre part, la fréquence de la cible est fixée à 0.25 Hz ou à 0.65 Hz selon le mode de coordination spontané que l'on cherche à faire émerger. Les groupes *expérimental* et *contrôle* sont divisés en deux de façon aléatoire : la moitié des participants réalise la tâche de poursuite de cible avec une fréquence de 0.25 Hz (groupes basse fréquence), et l'autre moitié, avec une fréquence de 0.65 Hz (groupes haute fréquence).

#### **2.3.1.3. Procédure**

##### *Groupes expérimentaux.*

9 participants sont placés dans le groupe expérimental basse fréquence et les 8 autres dans le groupe expérimental haute fréquence. Ils réalisent les sessions de test avec une fréquence de mouvement de la cible de 0.25 Hz et 0.65 Hz, respectivement. Sur la base

des travaux antérieurs sur la tâche de poursuite de cible (e.g., Bardy et al., 2002), un mode hanche-cheville en phase est attendu pour le groupe basse fréquence, et un mode en anti-phase pour le groupe haute fréquence. La Figure 2.10. présente la procédure suivie par l'ensemble des participants du groupe expérimental (basse et haute fréquence). L'expérimentation se déroule sur trois jours consécutifs (une heure par jour environ), plus un quatrième jour pour le test de rétention, une semaine après la pratique (environ quinze minutes). Concernant la session d'apprentissage, les participants effectuent 50 essais pendant lesquels la phase relative hanche-cheville de 135° doit être produite. Ces 50 essais sont répartis sur trois jours consécutifs de la façon suivante : 10 essais le premier jour, 20 le deuxième jour, et 20 le troisième jour. Comme pour l'expérimentation 1, les participants essayent de produire la phase relative de 135° sans que l'amplitude et la fréquence de mouvement soient contraintes. Tous les trois essais de pratique, une pause de trois minutes est effectuée, durant laquelle le même feedback que dans l'expérimentation 1 est donné (Figure 2.5.).



Session	Pré-T	App	I-1	App	I-2	App	I-3	App	I-4	App	Post-T		Rét
Nbr d'essais	4	10	4	10	4	10	4	10	4	10	4		4+4
Jour	1			2				3				4	

Figure 2.10. Protocole du groupe expérimental de l'expérimentation 2 (groupes haute et basse fréquence). Partie supérieure : Tâches lors des sessions de test (pré-test, tests intermédiaires, et post-test) et d'apprentissage. Partie inférieure : Organisation des sessions expérimentales (Pré-T : pré-test ; App : sessions d'apprentissage ; I-1 à I-4 : tests intermédiaires 1 à 4 ; Post-T : post-test ; Rét : test de rétention), et nombre d'essai par session pour chacun des quatre jours. Le test de rétention (jour 4, une semaine après le jour 3) comprend 4 essais sur la coordination apprise, et 4 sur la coordination spontanée.

Sept sessions de test, avec pour chacune, 4 essais sur la tâche de poursuite de cible, sont effectuées : le pré-test (avant la pratique de 135°), quatre tests intermédiaires (tous les 10 essais de pratique), le post-test (après le dernier essai de pratique), et le test de rétention (une semaine après la pratique). Le test de rétention comprend, en plus de la tâche de poursuite de cible, quatre essais où la coordination apprise de 135° doit être produite (pas de cible à suivre avec la tête). L'amplitude pic à pic de la cible est fixée à 10 cm pour l'ensemble des participants. Chaque essai, pour les sessions de test comme d'apprentissage, comprend 10 cycles d'oscillation.

#### *Groupe contrôle.*

Les participants du groupe contrôle n'apprennent pas la coordination de 135° et réalisent uniquement la tâche de poursuite de cible. Ils effectuent le même nombre d'essais que le groupe expérimental le troisième jour (28). Les 28 essais sur la tâche de poursuite de cible sont réalisés sur une session d'une heure environ. Les groupes contrôle basse fréquence ( $N = 4$ ) et haute fréquence ( $N = 3$ ) effectuent ces 28 essais avec une fréquence de mouvement de la cible de 0.25 Hz, et 0.65 Hz, respectivement. Comme pour les groupes expérimentaux, une pause de trois minutes est effectuée tous les trois essais. Bien sûr, pour les participants du groupe contrôle, aucun feedback augmenté n'est fourni étant donné qu'ils se coordonnent librement pour suivre la cible avec la tête. La comparaison des quatre premiers et des quatre derniers essais de la session du groupe contrôle permet d'évaluer si des changements de patrons spontanés peuvent être induit par un phénomène de fatigue.

#### **2.3.1.4. Variables dépendantes**

Pour les essais d'apprentissage, nous calculons la phase relative ( $\phi_{rel}$ ), l'erreur absolue ( $EA$ ), l'écart-type de la phase relative ( $ET\phi_{rel}$ ), et le temps de mouvement ( $TM$ ). Pour les essais sur la tâche de poursuite de cible, nous calculons la phase relative ( $\phi_{rel}$ ), l'écart-type de la phase relative ( $ET\phi_{rel}$ ), et le gain entre l'amplitude des mouvements de la tête et ceux de la cible. Pour chaque essai, le gain est calculé à chaque cycle d'oscillation comme la différence entre l'amplitude de la tête (position maximum - position minimum) et l'amplitude de la cible (position maximum - position minimum).

### 2.3.2. Résultats

L'objectif principal de l'expérimentation 2 est d'analyser si les conséquences de l'apprentissage de la phase relative de  $135^\circ$  diffèrent pour les modes posturaux spontanés en phase et en anti-phase. Après avoir identifié les modes spontanés adoptés par les participants lors du pré-test, nous examinerons l'évolution du patron de coordination réalisé lors de la session d'apprentissage. Nous analyserons ensuite les conséquences de l'apprentissage sur les modes spontanés au cours de la pratique, à la fin de celle-ci, et lors du test de rétention, avant de finir par l'amplitude des mouvements de la tête.

#### **2.3.2.1. Coordination spontanée lors du pré-test**

Les tests de non uniformité de Rayleigh menés sur la phase relative produite pour chaque participant montrent que 18 participants sur les 24 testés, présentent une direction préférée lors du pré-test,  $p < .05$  (i.e., les valeurs de phase relative se concentrent autour de la valeur de phase relative moyenne). Comme pour l'expérimentation 1, les participants ne remplissant pas ce critère sont exclus des analyses suivantes. Cette sélection assure la fiabilité des analyses statistiques que nous allons effectuer. Le nombre de participants s'élève ainsi à 6 dans le groupe expérimental basse fréquence, 6 dans le groupe expérimental haute fréquence, 3 dans le groupe contrôle basse fréquence, et 3 dans le groupe contrôle haute fréquence. Pour le groupe expérimental basse fréquence, tous les participants sauf un produisent un mode stable proche de la phase au pré-test, avec une valeur de phase relative moyenne de  $30.62^\circ$  ( $ET\phi_{rel} = 41.10^\circ$ ). Le sixième participant produit un mode en anti-phase avec une phase relative moyenne de  $168.91^\circ$ , et un écart-type de phase relative de  $49.01^\circ$ . Pour le groupe expérimental haute fréquence, tous les participants présentent un patron en anti-phase, dont la valeur de phase relative moyenne est de  $179.78^\circ$  avec un écart-type de phase relative de  $40.83^\circ$ . Ces modes de coordination observés sur les deux fréquences de cible, 0.25 Hz et 0.65 Hz, sont en accord avec les études précédentes (e.g., Bardy et al., 2002). Pour les groupes contrôle, les observations sont similaires : pour les quatre premiers essais, la phase relative moyenne est de  $28.10^\circ$  pour le groupe contrôle basse fréquence ( $ET\phi_{rel} = 51.49^\circ$ ), et de  $185.42^\circ$  pour le groupe contrôle haute fréquence ( $ET\phi_{rel} = 32.82^\circ$ ). Les phases relatives produites sont comparées entre les groupes contrôle et expérimental de même fréquence grâce à des tests de Watson-Williams. Le groupe contrôle basse fréquence ne diffère pas des 5 participants en phase du



groupe expérimental basse fréquence ( $F(1, 263) < 1, ns$ ), de même que le groupe contrôle haute fréquence ne diffère pas du groupe expérimental haute fréquence ( $F(1, 302) < 1, ns$ ).

### 2.3.2.2. Session d'apprentissage

#### *Evolution du patron produit avec la pratique.*

Des tests de Watson-Williams menés pour chaque participant sur la phase relative produite au pré-test et lors des quatre derniers essais de pratique montrent que 11 participants sur les 12 du groupe expérimental produisent un mode de coordination significativement différent du patron spontané initial à la fin de la session d'apprentissage,  $F_s > 75.44, p < .05$ . Le douzième participant, qui correspond au participant en anti-phase du groupe basse fréquence, ne présente pas de différence entre la phase relative spontanément produite lors du pré-test ( $\phi_{rel}$  moyenne de  $168.91^\circ$ ) et lors des quatre derniers essais de pratique de la session d'apprentissage ( $\phi_{rel}$  moyenne de  $153.16^\circ$ ),  $F(1, 61) = 1.60, ns$ . Il n'a pas appris à produire un nouveau mode de coordination (i.e., différent du mode spontané) et est donc exclu des analyses suivantes. Pour les participants ayant appris, la précision (erreur absolue), la stabilité (écart-type de la phase relative), ainsi que la vitesse d'exécution (temps de mouvement) s'améliorent avec la pratique (Figure 2.11.). Pour les analyses statistiques et la représentation graphique, les essais de pratique sont regroupés par bloc de 5 (soit 10 blocs de pratique pour les 50 essais de la session d'apprentissage).

Les progrès sont démontrés statistiquement par des ANOVAs  $2 \times 10$  (Groupe de fréquence  $\times$  Bloc de pratique), avec mesures répétées sur le deuxième facteur, réalisées sur  $EA$ ,  $ET\phi_{rel}$  et  $TM$  (voir les parties A, B et C de la Figure 2.11., respectivement). L'utilisation d'une analyse de variance linéaire à la place du test de Watson-Williams pour données circulaires nous permet ici de tester le facteur groupe et son interaction avec la quantité de pratique, afin de vérifier que les groupes expérimentaux haute et basse fréquence suivent la même évolution. Etant donné que les participants sont répartis dans les deux groupes de fréquence de façon aléatoire, nous n'attendons pas de différence d'apprentissage pour ces deux groupes. L'ANOVA menée sur l'erreur absolue,  $EA$ , révèle un effet du facteur Bloc ( $F(9, 81) = 2.04, p < .05$ ), mais pas d'effet du facteur Groupe ( $F(1, 9) < 1, ns$ ) ni d'effet d'interaction Groupe  $\times$  Bloc ( $F(9, 81) < 1, ns$ ). Pour l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , les résultats de l'ANOVA sont similaires, avec un effet significatif

du facteur Bloc ( $F(9, 81) = 2.29, p < .05$ ), et pas d'effet du facteur Groupe ( $F(1, 9) < 1, ns$ ) ni d'effet d'interaction Groupe  $\times$  Bloc ( $F(9, 81) < 1, ns$ ). L'ANOVA sur le temps de mouvement,  $TM$ , montre également un effet du facteur Bloc ( $F(9, 81) = 9.12, p < .05$ ), sans effet du facteur Groupe ( $F(1, 9) < 1, ns$ ) ni d'effet d'interaction Groupe  $\times$  Bloc ( $F(9, 81) < 1, ns$ ). Ces résultats montrent une amélioration du patron produit au cours de la session de pratique de la phase relative de  $135^\circ$  de façon similaire pour les deux groupes.

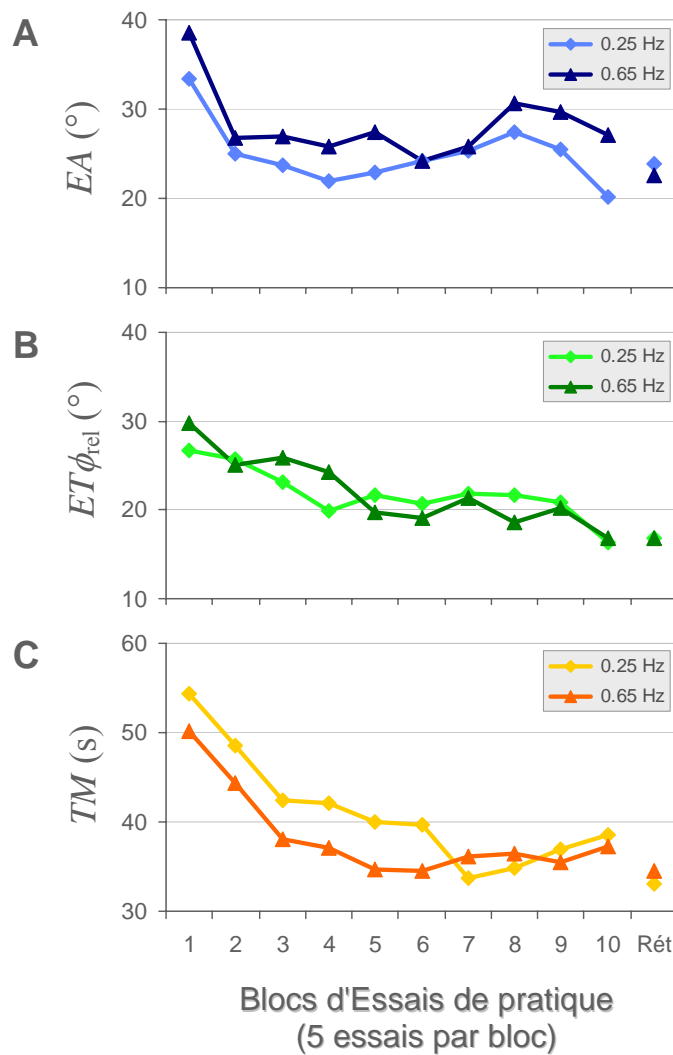


Figure 2.11. Résultats moyens pour les participants ayant appris un nouveau mode de coordination (groupes basse fréquence, 0.25 Hz et haute fréquence 0.65 Hz). Contrairement aux blocs d'essais de pratique qui contiennent chacun 5 essais, le test de rétention (Rét), mené une semaine après la pratique, ne comprend que 4 essais. Evolution (A) de l'erreur absolue, EA, (B) de l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , et (C) du temps de mouvement,  $TM$ , avec les essais de pratique.

*Rétention du patron appris.*

Le test de rétention mené une semaine après la pratique contient quatre essais sur la tâche de 135° en plus des quatre essais sur la tâche de poursuite de cible. Des tests de Watson-Williams menés pour les deux groupes de fréquence, sur les quatre derniers essais de pratique (essais 47-50) et les quatre essais de 135° du test de rétention, montrent que  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$  ne sont pas affectés après une semaine d'arrêt de la pratique (voir la Figure 2.11.). Pour l'erreur absolue, le groupe expérimental basse fréquence ne présente pas de différence significative entre la fin de l'apprentissage ( $EA = 20.98^\circ$ ) et le test de rétention ( $EA = 23.71^\circ$ ),  $F(1, 302) = 2.18$ , *ns*, de même que le groupe haute fréquence,  $F(1, 366) = 2.75$ , *ns* ( $EA$  moyenne de  $25.51^\circ$  à la fin de l'apprentissage et de  $21.97^\circ$  lors de la rétention). Pour l'écart-type de la phase relative, le groupe expérimental basse fréquence conserve la stabilité acquise à la fin de l'apprentissage ( $ET\phi_{rel} = 17.31^\circ$ ) lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 16.86^\circ$ ),  $F(1, 34) = 0.04$ , *ns*. Des résultats identiques sont trouvés pour le groupe haute fréquence, avec des valeurs moyennes de  $ET\phi_{rel}$  égales à  $17.84^\circ$  lors des derniers essais de pratique et à  $16.79^\circ$  lors du test de rétention,  $F(1, 42) = 0.14$ , *ns*. Le temps de mouvement ne présente lui non plus, aucune modification significative pour les deux groupes,  $ts(4) < 2.77$ , *ns*. Ces résultats suggèrent que le patron de coordination acquis durant la période d'apprentissage est reproductible après une semaine d'arrêt pour les deux groupes, et que le mode correspondant de 135° a donc été appris de façon durable.

*Différences individuelles sur l'apprentissage.*

Comme dans l'expérimentation 1, des analyses individuelles à partir de tests de Watson-Williams (quatre premiers vs. quatre derniers essais de pratique) sont conduites pour identifier d'éventuelles différences dans l'amélioration du patron de coordination avec la pratique. Les mêmes sous-groupes d'apprentissage que dans l'expérimentation 1 sont observés. Le sous-groupe *précision* ( $N = 4$ ) présente une diminution de la phase relative produite entre les quatre premiers ( $\phi_{rel} = 137.67^\circ$ ) et les quatre derniers essais de pratique ( $\phi_{rel} = 123.02^\circ$ ),  $F_s > 4.20$ ,  $p < .05$ , sans modification significative de l'écart-type ( $ET\phi_{rel} = 25.15^\circ$  au début et  $ET\phi_{rel} = 21.33^\circ$  à la fin),  $F_s < 5.53$ , *ns*. Le sous-groupe *stabilité* ( $N = 3$ ) adopte un comportement opposé, avec une amélioration de  $ET\phi_{rel}$  ( $31.89^\circ$  vs.  $12.47^\circ$ ,  $F_s > 7.99$ ,  $p < .05$ ) sans changement significatif de la phase relative produite ( $142.56^\circ$  vs.  $156.55^\circ$ ,  $F_s < 0.59$ , *ns*). Un participant présente un comportement *mixte* avec à la fois, un

changement pour  $\phi_{rel}$  ( $179.16^\circ$  vs.  $116.60^\circ$ ,  $F(1, 62) = 12.79$ ,  $p < .05$ ) et pour  $ET\phi_{rel}$  ( $56.27^\circ$  vs.  $20.23^\circ$ ,  $F(1, 6) = 7.57$ ,  $p < .05$ ). Le sous-groupe *immédiat* ( $N = 3$ ) produit un patron de coordination qui n'est pas modifié de façon significative entre le début ( $\phi_{rel} = 152.50^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 19.17^\circ$ ) et la fin de la pratique ( $\phi_{rel} = 149.07^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 16.94^\circ$ ),  $F_s < 1.71$ ,  $ns$ , et  $F_s < 4.02$ ,  $ns$ , pour  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$  respectivement. Ces résultats corroborent ceux de l'expérimentation 1 : les participants suivent des évolutions différentes durant la pratique du patron à apprendre.

### 2.3.2.3. Conséquences de l'apprentissage sur les patrons spontanés

Afin de déterminer les effets de l'apprentissage sur le mode de coordination spontané, nous comparons la phase relative produite et sa stabilité lors de la tâche de poursuite de cible à différents moments du processus d'apprentissage. Pour cela, des tests de Watson-Williams comparent  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$  pour les 7 sessions de test des groupes expérimentaux (pré-test, tests intermédiaires 1 à 4, post-test et test de rétention). L'absence de différence entre les quatre premiers et les quatre derniers essais de la session des groupes contrôle (basse et haute fréquence) pour  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$  confirme que tout changement observé pour les groupes expérimentaux au niveau du patron spontané pourra être attribué à l'apprentissage de  $135^\circ$ . Pour le groupe contrôle basse fréquence, la phase relative reste constante entre le début ( $\phi_{rel} = 28.10^\circ$ ) et la fin de la session expérimentale ( $\phi_{rel} = 31.63^\circ$ ),  $F(1, 214) < 1$ ,  $ns$ , de même que l'écart-type de la phase relative ( $51.49^\circ$  au début, et  $48.66^\circ$  à la fin),  $F(1, 22) < 1$ ,  $ns$ . De la même façon, pour le groupe contrôle haute fréquence, aucune différence de phase relative n'est constatée entre le début ( $\phi_{rel} = 185.42^\circ$ ) et la fin de la session expérimentale ( $\phi_{rel} = 187.09^\circ$ ),  $F(1, 214) < 1$ ,  $ns$ , tout comme pour l'écart-type de la phase relative ( $32.82^\circ$  au début, et  $31.87^\circ$  à la fin),  $F(1, 22) < 1$ ,  $ns$ . Analysons maintenant les résultats obtenus par les groupes expérimentaux lors des sessions de test.

#### *Groupe basse fréquence (0.25 Hz).*

Nous avons constaté, lors de l'analyse de la phase relative produite au pré-test, que l'un des participants du groupe expérimental basse fréquence produisait un patron spontané initial en anti-phase. Ce participant est aussi le seul à ne pas avoir produit un nouveau mode de coordination (i.e., différent de ce qu'il produisait spontanément) à l'issue des 50

essais de pratique sur la tâche de 135°. Nous ne pouvons donc évaluer les conséquences de l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination pour ce participant. Pour les cinq autres participants, la phase relative spontanée subit des modifications avec l'augmentation de la quantité de pratique de 135° (Figure 2.12.A). A partir du mode spontané initial en phase, les participants dérivent en direction de la phase relative apprise, tous les tests présentant des valeurs de phase relative différentes du pré-test,  $F_s > 19.26$ ,  $p < .05$ . La phase relative moyenne augmente jusqu'à atteindre une valeur proche du patron appris lors du test intermédiaire n°3 ( $\phi_{rel} = 128.49^\circ$ ). Lors des tests suivants, elle se stabilise autour de 80°-90°, état intermédiaire entre le patron initial en phase ( $\phi_{rel} = 30.62^\circ$ ) et le patron appris de 135°. La phase relative produite lors du post-test ( $\phi_{rel} = 93.46^\circ$ ) ne diffère pas significativement de celle du test de rétention ( $\phi_{rel} = 110.31^\circ$ ),  $F(1, 311) = 1.61$ , *ns*, ce qui indique que les modifications sont durables. Cette évolution générale (augmentation de la phase relative par rapport au pré-test) se vérifie individuellement, sauf pour un participant qui ne présente pas de modification de la phase relative avant le test de rétention (phase relative moyenne de  $-24.31^\circ$  au pré-test, de  $-26.58^\circ$  au post-test, et de  $149.09^\circ$  au test de rétention),  $F(1, 65) = 108.26$ ,  $p < .05$  entre le pré-test et le test de rétention. Lors du test de rétention, tous les participants sauf un, présentent une coordination spontanée différente du pré-test,  $F_s > 18.74$ ,  $p < .05$ . Le participant faisant l'exception revient à la valeur de phase relative initiale du pré-test ( $\phi_{rel} = 3.64^\circ$ ) lors du test de rétention ( $\phi_{rel} = 10.91^\circ$ ), alors qu'il avait présenté un changement de coordination au cours de la pratique allant jusqu'à  $\phi_{rel} = 114.26^\circ$  lors du test intermédiaire n°3 ( $F(1, 65) < 1$ , *ns*, entre le pré-test et la rétention).

La stabilité du groupe de 5 participants augmente légèrement entre le pré-test ( $ET\phi_{rel} = 41.10^\circ$ ) et le post-test ( $ET\phi_{rel} = 50.33^\circ$ ), mais de façon non significative quel que soient les tests considérés,  $F_s < 4.13$ , *ns*, test de rétention compris ( $ET\phi_{rel} = 50.30^\circ$ ). Les analyses individuelles comparant  $ET\phi_{rel}$  au pré-test et pour chaque test postérieur montrent qu'un participant (sur les 5) présente une augmentation significative de l'écart-type de la phase relative. Pour ce participant, une diminution de la stabilité du patron spontané est constatée entre le pré-test ( $ET\phi_{rel} = 30.22^\circ$ ) et le test I-4 ( $ET\phi_{rel} = 58.50^\circ$ ), ainsi qu'entre le pré-test et le post-test ( $ET\phi_{rel} = 63.25^\circ$ ),  $F_s(1, 6) > 6.86$ ,  $p < .05$ . Il est intéressant de noter que ce participant est celui qui ne présentait pas de modification de la phase relative produite avant le test de rétention. L'évolution de la coordination spontanée pour ce

participant est donc la suivante : augmentation de la variabilité du patron spontané initial (i.e., perte de stabilité) après 400 cycles de pratique de  $135^\circ$ , puis modification de la phase relative spontanée en direction du patron appris lors du test de rétention (la stabilité revenant à une valeur comparable à sa valeur du pré-test). Soulignons qu'en accord avec les résultats de l'expérimentation 1, ce participant est le plus stable initialement sur la tâche du pré-test ( $ET\phi_{rel} = 30.22^\circ$ ).

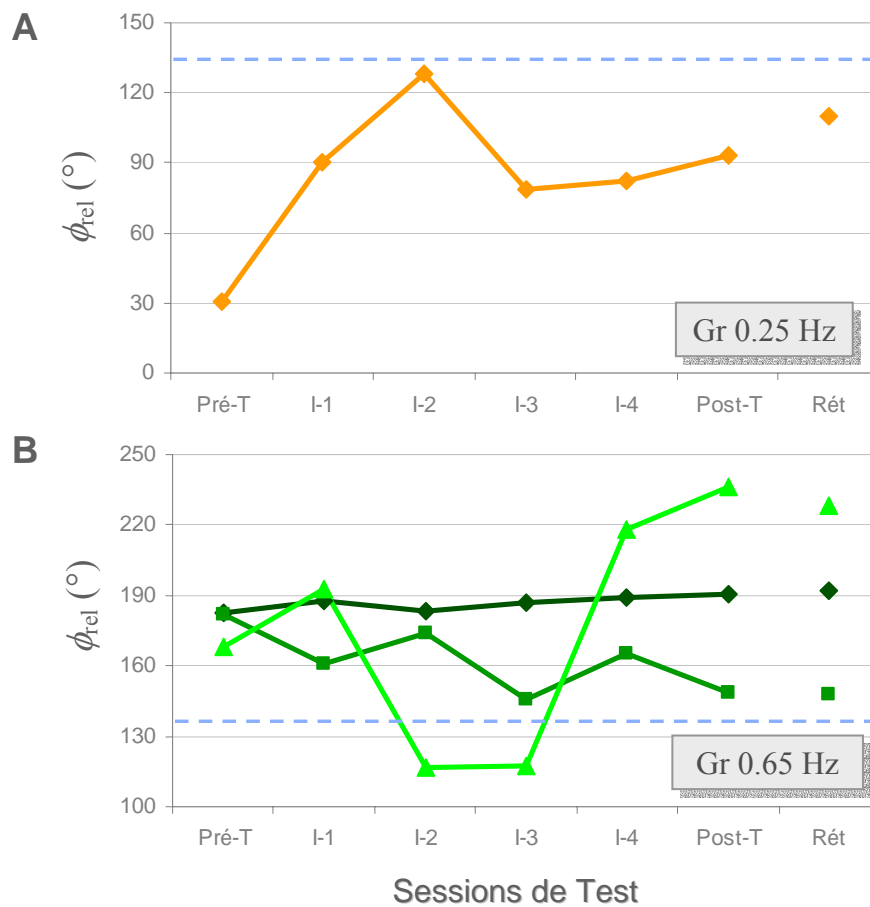


Figure 2.12. Modifications de la phase relative spontanée moyenne lors des sept sessions de test sur la tâche de poursuite de cible : pré-test (Pré-T), tests intermédiaires (I-1 à I-4), post-test (Post-T), test de rétention (Rét). La ligne en pointillés bleue représente le mode de coordination à apprendre durant la session de pratique. A : Groupe expérimental basse fréquence (Gr 0.25 Hz). B : Groupe expérimental haute fréquence (Gr 0.65 Hz), pour lequel 3 comportements se distinguent sur la base de la stabilité initiale du patron spontané ( $ET\phi_{rel}$  au pré-test). De la courbe la plus foncée à la plus claire : les deux participants les plus stables initialement (losanges), les deux participants présentant une stabilité initiale intermédiaire (carrés), et les deux participants les moins stables initialement (triangles).

*Groupe haute fréquence (0.65 Hz).*

L'analyse du groupe expérimental haute fréquence ( $N = 6$ ) indique que les phases relatives produites ne diffèrent pas significativement entre le pré-test et les tests ultérieurs,  $F_s < 3.05$ , *ns*. Les analyses individuelles contredisent pourtant cette tendance moyenne, en mettant en évidence qu'elle résulte de comportements opposés. Grâce au test de Watson-Williams (comparaisons par paire), trois types de modifications du patron de coordination spontané sont observés (Figure 2.12.B), menant à la distinction de trois sous-groupes, chacun composé de deux participants.

Premièrement, pour deux participants, les comparaisons entre le pré-test et les tests ultérieurs ne montrent aucune modification de la phase relative spontanée,  $F_s(1, 140) < 3.85$ , *ns*. Deuxièmement, pour deux autres participants, le patron spontané se déplace progressivement vers le patron appris, passant ainsi d'une valeur moyenne de phase relative de  $181.62^\circ$  lors du pré-test à  $148.52^\circ$  lors du post-test. Les tests de Watson-Williams montrent une différence significative entre le pré-test et les tests suivants : I-1 ( $\phi_{rel} = 160.55^\circ$ ), I-3 ( $\phi_{rel} = 145.63^\circ$ ), le post-test ( $\phi_{rel} = 148.52^\circ$ ) et la rétention ( $\phi_{rel} = 147.63^\circ$ ),  $F_s > 4.69$ ,  $p < .05$ . Pour les tests I-2 ( $\phi_{rel} = 174.26^\circ$ ) et I-4 ( $\phi_{rel} = 164.98^\circ$ ), la phase relative revient temporairement près de sa valeur initiale,  $F_s < 1.61$ , *ns*. Par contre, le patron spontané émergent à la fin de la session d'apprentissage reste identique lors du test de rétention ( $F(1, 115) < 1$ , *ns*), ce qui montre, pour ces deux participants, une modification durable du patron spontané initial à l'issue des 50 essais de pratique du patron de  $135^\circ$ . Troisièmement, les deux derniers participants présentent une modification discontinue de la coordination spontanée. Lors des tests I-2 et I-3 (i.e., après, respectivement, 20 et 30 essais de pratique du mode de  $135^\circ$ ), ces participants produisent un patron spontané dévié en direction du patron appris. La diminution de la phase relative produite entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 168.47^\circ$ ) et les tests I-2 ( $\phi_{rel} = 116.51^\circ$ ) et I-3 ( $\phi_{rel} = 117.44^\circ$ ) est significative,  $F_s > 5.20$ ,  $p > .05$ . Lors du quatrième test intermédiaire, le patron de coordination produit bifurque soudainement vers une valeur moyenne de  $217.79^\circ$ . Cette valeur est ensuite conservée lors du post-test ( $\phi_{rel} = 236.49^\circ$ ) et lors du test de rétention ( $\phi_{rel} = 228.59^\circ$ ) : les comparaisons par paire ne montrent pas de différence de phase relative entre I-4, le post-test, et le test de rétention,  $F_s < 1$ , *ns*. Lors de ces trois tests, la phase relative produite diffère de la phase relative spontanée initiale (pré-test),  $F_s > 6.98$ ,  $p < .05$ . L'intervalle de

confiance à 95% contient  $180^\circ$  lors du pré-test ( $145.98^\circ < \phi_{rel} < 190.95^\circ$ ) et de I-1 ( $152.17^\circ < \phi_{rel} < 233.95^\circ$ ),  $135^\circ$  lors de I-2 ( $70.82^\circ < \phi_{rel} < 162.19^\circ$ ) et de I-3 ( $71.54^\circ < \phi_{rel} < 163.34^\circ$ ), et  $225^\circ$  lors de I-4 ( $188.69^\circ < \phi_{rel} < 246.88^\circ$ ), du post-test ( $203.28^\circ < \phi_{rel} < 269.69^\circ$ ) et du test de rétention ( $199.82^\circ < \phi_{rel} < 257.36^\circ$ ). Il est intéressant de constater que, pour ces deux participants, la phase relative spontanée atteinte à l'issue de l'apprentissage, d'une valeur proche de  $225^\circ$ , correspond au patron symétrique du patron appris,  $135^\circ$ . Des effets de transfert positif entre deux patrons de coordination symétriques ont déjà été constatés dans les études sur le système bi-manuel (e.g., Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1997). Nos résultats suggèrent qu'un transfert de coordination comparable peut avoir lieu au sein du système postural hanche-cheville, système mettant en jeu des segments non-homologues (i.e., aux propriétés différentes). Pour les trois sous-groupes, le test de rétention montre que les participants conservent le patron adopté lors du post-test une semaine après la session de pratique ( $F_s < 1$ , *ns*), ce qui montre que les changements (ou l'absence de changement) occasionné(s) par l'apprentissage sont relativement durables.

Les analyses individuelles révèlent donc des effets masqués par l'analyse du groupe, à savoir la modification du patron de coordination spontané initial pour 4 participants sur 6. Le fait que cette modification ne soit pas visible lors de l'analyse par groupe est dû à l'opposition des comportements observés (2 participants en direction du patron appris vs. 2 participants dans la direction opposée). D'autre part, il est important de souligner que les différences individuelles que nous venons de décrire (pas de modification, modification en direction de  $135^\circ$ , modification en direction du patron symétrique à  $135^\circ$ ) correspondent à des stabilités initiales différentes. Les deux participants les plus stables initialement ( $ET\phi_{rel} = 25.50^\circ$  au pré-test) sont ceux qui ne sont pas déstabilisés après la période de pratique. Les deux participants intermédiaires du point de vue de la stabilité initiale ( $ET\phi_{rel} = 36.74^\circ$  au pré-test) sont ceux qui présentent un changement de patron spontané en direction du patron appris. Pour finir, les participants les moins stables initialement ( $ET\phi_{rel} = 60.78^\circ$  au pré-test) présentent une modification inattendue du patron spontané en direction du mode symétrique au patron appris. Ces résultats peuvent être mis en rapport avec ceux de l'expérimentation 1, pour lesquels la



nature de la modification du patron spontané s'était aussi révélée être dépendante de la stabilité initiale.

Les analyses individuelles menées sur l'écart-type de la phase relative révèlent une augmentation de la variabilité entre le pré-test et au moins un des tests postérieurs, pour deux participants sur les six,  $F_s(1, 6) > 9.14, p < .05$ . Ces deux participants font partie des quatre qui présentent une modification de la phase relative produite. Contrairement aux analyses faites jusqu'à présent (expérimentation 1 et groupe basse fréquence de l'expérimentation 2), ce ne sont pas les participants les plus stables initialement qui présentent une augmentation de la variabilité.

#### **2.3.2.4. Amplitude des mouvements de la tête lors de la tâche de poursuite de cible**

L'amplitude des mouvements de la tête est analysée lors des sessions de test sur la tâche de poursuite de cible, en terme de gain tête/cible. Le gain correspond au rapport amplitude de tête / amplitude de cible, calculé pour chaque cycle d'oscillation. Un gain de 1 signifie que le participant suit exactement l'amplitude de la cible avec la tête. Dans cette expérimentation, l'amplitude de cible était fixée à 10 cm pic à pic pour tous les essais de toutes les sessions de test. L'analyse du gain nous permet d'évaluer l'influence de la fréquence d'oscillation de la cible sur l'amplitude de la tête. Précédemment, il a été montré que des fréquences de cibles importantes favorisaient de petites amplitudes de tête alors que des fréquences plus basses induisaient des amplitudes de tête plus grandes (Bardy et al., 2002 ; Oullier et al. 2002). D'autre part, nous pouvons aussi analyser si les changements de coordination sont accompagnés (ou influencés) par des changements de l'amplitude de la tête.

Les gains moyens pour les sept sessions de test sont représentés dans la Figure 2.13. pour les deux groupes expérimentaux (haute et basse fréquence de cible). Le gain moyen sur l'ensemble des sessions de test est de 2.14 pour le groupe basse fréquence et de 1.03 pour le groupe haute fréquence. Ces valeurs moyennes sont représentatives du gain adopté lors des différentes sessions de test (Figure 2.13.). Autrement dit, les participants du groupe haute fréquence respectent la consigne de garder une distance constante entre la tête et la cible, alors que les participants du groupe basse fréquence produisent une

amplitude de tête environ deux fois supérieure à celle requise. Ces observations graphiques sont confirmées par une ANOVA Groupe (2) × Test (7) avec mesures répétées sur le deuxième facteur. Cette analyse montre un effet significatif du Groupe sur le gain  $F(1, 10) = 39.04$ ,  $p < .05$ , alors qu'il n'y a pas d'effet du facteur Test ( $F(6, 60) < 1$ ,  $ns$ ) ou d'interaction Groupe × Test ( $F(6, 60) = 1.32$ ,  $ns$ ). La plus haute amplitude de tête pour le groupe basse fréquence est en accord avec les observations précédentes (Bardy et al., 2002). D'autre part, l'absence de modification de l'amplitude de la tête au cours des différentes sessions de test indique que cette variable n'est pas dépendante (ou pas responsable) des changements de la coordination spontanée induits par l'apprentissage du patron de  $135^\circ$ .

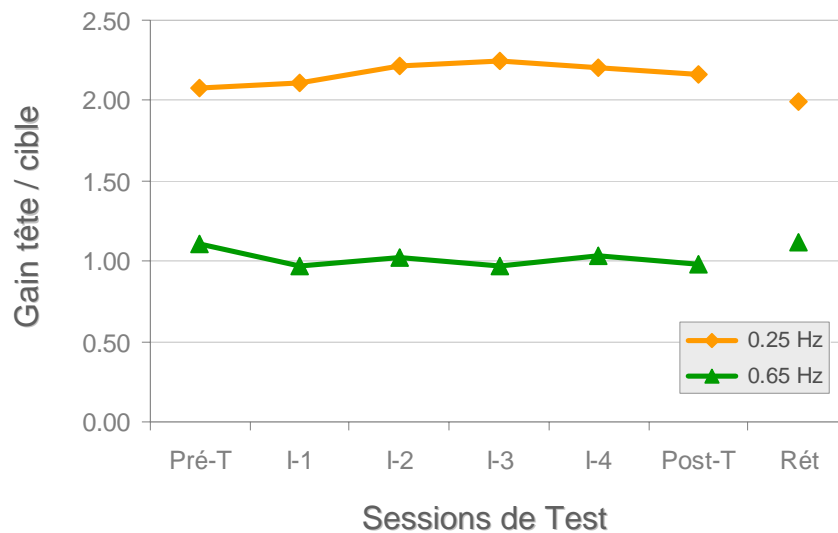


Figure 2.13. Gain tête / cible pour les deux groupes expérimentaux de fréquence de cible (0.25 Hz et 0.65 Hz), lors des sept sessions de test sur la tâche de poursuite de cible : pré-test (Pré-T), tests intermédiaires (I-1 à I-4), post-test (Post-T), et test de rétention (Rét).

## 2.4. Discussion Générale

Les expérimentations 1 et 2 avaient pour but d'étudier l'interaction entre les modes posturaux spontanés et l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination. Pour cela, les participants ont appris une phase relative hanche-cheville non spontanée de  $135^\circ$ , et leur

patron spontané a été testé à différents moments du processus d'apprentissage. Les résultats des deux expérimentations (i) confirment la phase et l'anti-phase en tant que patrons intrinsèques, (ii) montrent que la pratique du mode hanche-cheville de  $135^\circ$  mène à son apprentissage, (iii) révèlent que l'apprentissage de ce nouveau mode provoque une modification du patron de coordination spontané lors de la réalisation de la tâche supra-posturale, et (iv) mettent en évidence d'importantes différences individuelles concernant la façon dont le nouveau patron est appris, et la façon dont l'apprentissage modifie le patron spontané. D'autre part, (v) le test de rétention mené dans l'expérimentation 2 révèle que les conséquences de l'apprentissage (performance du patron appris et modifications du patron spontané) sont relativement durables. Ces résultats sont discutés ci-dessous, en relation avec ceux obtenus précédemment pour les coordinations bi-manuelles.

*Patrons de coordination spontanés initiaux.*

En accord avec les expérimentations précédentes menées par Bardy et ses collaborateurs (e.g., Bardy et al., 1999), deux patrons posturaux spontanés sont observés au pré-test : en phase ( $\phi_{rel} \approx 30^\circ$ ) et en anti-phase ( $\phi_{rel} \approx 180^\circ$ ). Certains participants ne présentent pas de coordination initiale stable lors de la réalisation de la tâche supra-posturale. Ainsi, le test de non uniformité de Rayleigh mène à exclure 4 participants sur 24 pour la première expérimentation, et 6 sur 24 pour la deuxième expérimentation. Ce résultat doit être appréhendé dans le cadre de la nature non imposée de la coordination produite, qui mène à des modes moins stables que lorsque les participants ont l'instruction de produire une coordination précise. Certains participants oscillent entre un patron en phase et en anti-phase, ce qui mène à des phases relatives moyennées non pertinentes. Un nombre de cycles analysés plus important permettrait d'obtenir des valeurs significatives pour le test de Rayleigh de façon plus systématique. La fréquence d'oscillation semble aussi jouer un rôle important car lorsque l'on identifie la fréquence d'oscillation préférée des participants parmi une gamme de cinq fréquences possibles (groupe expérimental de l'expérimentation 1) seul 1 participant sur 15 ne présente pas de coordination directionnelle.

*Apprentissage du patron non spontané.*

La pratique du patron hanche-cheville non spontané de  $135^\circ$  mène à une augmentation de sa précision, de sa stabilité, et de la vitesse d'exécution. La grande

majorité des participants produit un patron significativement différent du mode de coordination initial à l'issue de la session de pratique. Seuls 3 participants sur les 26 des expérimentations 1 et 2 n'apprennent pas le patron de 135°. Pour les participants ayant appris, une attraction vers le mode spontané en anti-phase est constatée lors des premiers essais de pratique, puis cette attraction est surmontée, ce qui permet de produire le mode de coordination requis. Ces résultats sont en accord avec les prédictions théoriques (e.g., Zanone & Kelso, 1994), et les observations expérimentales antérieures sur le système bi-manuel (e.g., Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997 ; Zanone & Kelso, 1992a).

D'autre part, dans l'expérimentation 1, nous testons l'hypothèse avançant que la facilité à produire et à apprendre, varie de façon inversement proportionnelle à la stabilité de l'attracteur intrinsèque le plus proche du patron exigé (e.g., Zanone & Kelso, 1994). Pour cela, nous effectuons des corrélations entre la stabilité initiale du patron spontané en anti-phase ( $ET\phi_{rel}$  au pré-test), et les indicateurs de performance ( $EA$ ,  $ET\phi_{rel}$ ,  $TM$ ) sur les premiers et les derniers essais de pratique de 135°<sup>7</sup>. Cette méthode diffère de celle généralement utilisée dans les études bi-manuelles (Fontaine et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002), qui consiste à comparer des groupes de participants apprenant des modes proches du patron intrinsèque le plus stable (en phase), versus le moins stable (en anti-phase). Par exemple, Fontaine et al. (1997) font apprendre soit 45°, soit 135°, ce dernier (proche de l'anti-phase) devant, en théorie, être plus rapidement appris que le premier (proche de la phase). Une autre façon d'étudier la prédiction théorique est de considérer l'importance de la stabilité d'un même attracteur : un participant très stable initialement aura plus de difficulté à produire et à apprendre un nouveau mode de coordination qu'un participant présentant un attracteur initial moins fort. Les corrélations menées dans l'expérimentation 1 vont à l'encontre de cette hypothèse : aucune relation n'est trouvée entre la stabilité initiale du patron en anti-phase ( $ET\phi_{rel}$  au pré-test) et la facilité à produire (indicateurs de performance lors des premiers essais de pratique) ou à apprendre (indicateurs de performance lors des derniers essais de pratique) le mode de 135°. Bien qu'en opposition par rapport aux prédictions théoriques, cette absence de relation est conforme aux résultats obtenus par Fontaine et al. (1997) et Wenderoth et al. (2002) pour les coordinations bi-manuelles. Ils observent que les patrons proches du patron intrinsèque

---

<sup>7</sup> Dans l'expérimentation 2, le nombre de participants par groupe est insuffisant pour pouvoir effectuer une corrélation.

en phase (le plus stable) ne sont pas moins bien produits ou appris que les patrons proches de l'anti-phase. Lorsque des différences apparaissent, c'est même l'attracteur de  $180^\circ$  qui interfère avec le patron à apprendre de façon plus importante que l'attracteur de  $0^\circ$ .

Pour finir, les analyses individuelles révèlent différentes évolutions du patron de coordination produit au cours de la pratique. Pour les groupes apprentissage des deux expérimentations, certains participants ( $N = 8$ ) améliorent uniquement la précision du patron produit par rapport au patron à apprendre (diminution de l'erreur), d'autres ( $N = 6$ ) améliorent uniquement la stabilité (diminution de la variabilité), quelques uns ( $N = 3$ ) améliorent à la fois précision et stabilité, et d'autres ( $N = 6$ ) produisent un patron précis et stable dès le début de la pratique, sans qu'il y ait de changement significatif ensuite. Ces différents types de comportements mènent à des patrons produits comparables à la fin de la session de pratique, ce qui montre la pluralité des itinéraires qui peuvent être empruntés pour apprendre une habileté. Les différences individuelles au cours du processus d'apprentissage ont déjà été soulignées dans les expérimentations sur l'apprentissage bi-manuel (e.g., Lee et al., 1995 ; Zanone & Kelso, 1997). Les origines de ces différences ne sont pas clairement définies, et résultent sans doute de nombreux facteurs mécaniques, perceptifs, ou relatifs à l'expérience motrice du sujet.

*Modification du patron de coordination spontané en conséquence de l'apprentissage.*

La pratique et la stabilisation de la phase relative hanche-cheville de  $135^\circ$  a des conséquences sur le patron de coordination émergeant spontanément. Lors de la réalisation de la tâche supra-posturale après apprentissage, le patron spontané produit est modifié par rapport au patron initial, bien souvent en direction du patron appris. Cette modification apparaît alors que l'information comportementale, présente lors de la session d'apprentissage (i.e., intention de produire  $135^\circ$ ), n'est plus source de contrainte sur le système postural. Le changement de patron spontané, qui se vérifie pour 18 des 23 participants ayant appris dans les expérimentations 1 et 2 (soit 78 %), est sujet à de fortes différences individuelles. En combinant les participants ayant appris le patron de  $135^\circ$  dans les deux expérimentations, nous pouvons distinguer quatre types de modification du patron spontané en conséquence de l'apprentissage. Pour la majorité des participants (12 sur 23), la modification du patron spontané initialement en phase ou en anti-phase correspond à une

dérive en direction du patron de coordination de  $135^\circ$ , jusqu'à atteindre un mode autour de  $90^\circ$ . Lorsqu'elle est considérée par rapport au patron spontané initial en anti-phase (expérimentation 1), on peut dire que cette dérive dépasse le mode de coordination appris. Par contre, si elle est considérée par rapport au patron spontané initial en phase (groupe basse fréquence de l'expérimentation 2), on dirait au contraire qu'elle se situe entre le patron spontané initial et le patron appris. Il ne semble donc pas pertinent de faire référence à la distance entre le patron spontané initial et le patron spontané modifié par l'apprentissage (dépassement du patron appris vs. mode intermédiaire) pour expliquer le mode de  $90^\circ$  adopté lors du post-test. La raison de l'apparition de ce mode plutôt que d'un patron centré autour du patron appris reste une question ouverte. Le deuxième type de modification du patron spontané concerne deux participants (groupe haute fréquence, expérimentation 2), qui après avoir présenté une dérive vers  $135^\circ$ , après 200 cycles de pratique, bifurquent vers  $225^\circ$ , symétrique du patron appris, après 400 cycles de pratique. Ce résultat est particulièrement intéressant dans le cadre de la coordination de membres non-homologues. Des études sur les coordinations bi-manuelles ont mis au jour un transfert positif entre le patron appris et son symétrique non pratiqué (Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1997). Leurs résultats indiquent que le mode appris est indépendant de l'ordre entre les composants coordonnés. Dans notre étude, l'adoption du mode symétrique au patron appris est marginal (2 participants sur 23 ayant appris), mais suggère qu'un système de coordination asymétrique (i.e., membres non-homologues) peut présenter un transfert entre coordinations comparable à celui observé pour le système bi-manuel. Pour finir, 4 participants (expérimentation 1) produisent une phase relative moyenne semblable au patron spontané initial, mais avec une variabilité significativement plus importante, indiquant une déstabilisation du patron spontané initial en anti-phase. Notons que la perte de stabilité est également observée pour trois participants de l'expérimentation 2 (un pour le groupe basse fréquence, et deux pour le groupe haute fréquence) mais de façon couplée à la modification de la phase relative produite.

Il est intéressant de souligner que le type de modification observé semble dépendre de la stabilité initiale du patron de coordination spontané ( $ET\phi_{rel}$  au pré-test). Dans l'expérimentation 1, pour les participants les plus instables initialement, l'apprentissage entraîne un changement de la phase relative spontanée en direction du patron appris, alors que pour les participants les plus stables initialement, il y a perte de stabilité sans que la

phase relative moyenne soit modifiée. Dans l'expérimentation 2, les différences individuelles relatives à la modification du patron spontané sont observées pour le groupe haute fréquence. Dans ce groupe, les participants les plus stables initialement ne montrent aucun changement entre le pré-test et le post-test, les participants moyens du point de vue de la stabilité initiale présentent une déviation du mode en anti-phase vers le patron appris, et les participants les moins stables bifurquent vers le symétrique au patron appris.

*Persistance des conséquences de l'apprentissage (performance du patron appris et modifications du patron spontané).*

Le test de rétention mené dans l'expérimentation 2 révèle que les conséquences de la pratique, d'une part la performance acquise à l'issue des 500 cycles d'oscillation sur la tâche de 135°, et d'autre part les modifications du patron spontané dues à l'apprentissage, sont conservées après une semaine d'arrêt de la pratique. La persistance des caractéristiques du patron appris est conforme aux résultats obtenus concernant les coordinations bi-manuelles pour des durées supérieures ou égales à une semaine (Fontaine et al., 1997 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1992a). Pour les deux types de coordination (bi-manuelles et posturales), le patron appris peut être reproduit de façon stable et précise après une interruption de la pratique.

La persistance des modifications du patron spontané entre le post-test et le test de rétention est effective pour tous les types de comportements observés dans l'expérimentation 2 (modification en direction de 135°, en direction de 225°, ou pas de modification). Ce résultat est plus difficile à comparer avec ceux du système bi-manuel parce que la nature de la tâche testant le patron intrinsèque est différente (patron spontané vs. requis). De plus les observations obtenues dans les expérimentations bi-manuelles sont divergentes. Dans certaines études, sans qu'il y ait de test de rétention, l'évolution des patrons de coordination intrinsèques au cours de la pratique suggère que le patron en anti-phase peut être temporairement réprimé, mais pas déstabilisé de façon permanente par l'apprentissage d'un nouveau mode (e.g., Fontaine et al., 1997 ; Lee et al, 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Swinnen et al., 1997). Au contraire, Zanone et Kelso (1992a, 1997 ; Kelso & Zanone, 2002), observent de façon répétée une déstabilisation du mode intrinsèque en anti-phase en conséquence de l'apprentissage d'un nouveau patron. Parmi ces expérimentations, seules deux réalisent un test de rétention : Zanone et Kelso (1992a),

une semaine après la pratique, et Fontaine et al. (1997), quatre semaines après. Chacune montre que ses propres résultats obtenus à la fin de la pratique, sont reproduits lors du test de rétention, ce qui mène de nouveau à des conclusions contradictoires. Nos résultats sur les coordinations hanche-cheville montrent clairement que le mode émergent spontanément lors de la réalisation de la tâche supra-posturale est modifié à la suite de l'apprentissage, et que cette modification persiste une semaine après la session de pratique.

*Conclusion.*

Le changement du patron de coordination spontané en conséquence de la pratique de 135° est un résultat primordial qui montre que l'apprentissage d'un nouveau patron peut avoir des conséquences en l'absence d'exigence spécifique sur le mode de coordination à adopter. Ces conséquences se font au détriment de l'émergence des patrons intrinsèques initiaux. Néanmoins, la nature particulière de la tâche supra-posturale limite les comparaisons avec les résultats obtenus dans les coordinations bi-manuelles. Est-ce que la modification du patron spontané signifie que les patrons intrinsèques ne peuvent plus être produits de façon stable ? L'apprentissage d'un nouveau mode de coordination provoque-t-il une diminution de la performance des patrons posturaux intrinsèques lorsque ceux-ci sont requis ? Il semble important d'évaluer l'interaction entre l'apprentissage et les patrons intrinsèques lorsque ces derniers sont exigés par le but de la tâche. C'est l'objectif principal du chapitre suivant.



# CHAPITRE 3

---

---

## Coordinations Requises et Apprentissage

Dans les recherches menées sur l'interaction entre dynamique intrinsèque et apprentissage, les coordinations testées (quasi exclusivement bi-manuelles) sont toujours spécifiées par une information comportementale : les participants ont pour instruction de produire un mode de coordination spécifique. De plus, ils disposent, dans la plupart des expérimentations, d'une information visuelle ou auditive caractérisant cette coordination durant l'exécution du mouvement (e.g., métronome auditif), voire d'un feedback augmenté en temps réel donnant l'écart entre le patron produit et celui qui est exigé (figure de Lissajous). Dans les expérimentations 1 et 2, nous nous sommes intéressés aux interactions entre l'apprentissage et les modes intrinsèques émergeant de la réalisation d'une tâche supra-posturale (i.e., pour laquelle le but n'est pas la coordination elle-même). Lors des sessions de test de ces expérimentations, l'objectif des participants était de garder une distance constante entre la tête et une cible carrée oscillant virtuellement sur un axe antéropostérieur. La différence avec une tâche où la coordination à produire est spécifiée est notable. Une coordination émergeant de la réalisation d'une tâche supra-posturale peut être qualifiée de *spontanée*. Ce type de tâche présente un intérêt tout particulier étant donné que la grande majorité des mouvements, quotidiens ou sportifs, a pour but une action dans l'environnement, et non à la façon de coordonner les différents segments du corps. Après avoir étudié l'apprentissage dans ce cadre, il nous a néanmoins semblé important d'investiguer les coordinations spécifiées par une information comportementale, afin de pouvoir confronter les résultats obtenus pour le système postural et le système bi-manuel. Il sera ainsi possible d'évaluer le degré d'abstraction du processus d'apprentissage et de ses principes, par rapport au système effecteur envisagé.

Dans les expérimentations 3, 4 et 5, le mode de coordination n'émerge plus spontanément à partir de buts non-spécifiques (garder une distance constante entre la tête et la cible), mais constitue le but de la tâche pour le participant (par exemple, produire 180°). Dans les études sur les coordinations bi-manuelles, différentes sources d'information ont été utilisées afin de spécifier le patron requis aux participants. La phase relative à produire peut être démontrée et expliquée (e.g., Amazeen, 2002 ; Fontaine et al., 1997), elle peut être indiquée par des métronomes auditifs ou visuels (e.g., Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997) ou encore correspondre à un feedback augmenté, sous forme de figure de Lissajous (e.g., Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002). Étant donné

le caractère peu habituel d'une coordination hanche-cheville spécifiée<sup>8</sup>, la troisième technique semble être la plus appropriée afin de garantir que les participants aient une intention juste par rapport à la phase relative souhaitée. Nous utilisons donc un retour graphique en cours de mouvement qui représente le mouvement des chevilles en fonction de celui des hanches. Dans cet espace hanche-cheville (ou figure de Lissajous), le participant voit la forme à produire (pour chaque phase relative hanche-cheville correspond une forme elliptique allant du segment de droite au cercle), ainsi que ses propres mouvements. Il peut ainsi, durant la réalisation de la coordination, voir et chercher à réduire l'écart entre ce qu'il produit et ce qui est attendu. Cette méthode permet non seulement de demander des phases relatives très précises aux participants (avec des démonstrations et des explications seules, l'intention du participant est relativement vague), mais aussi d'être un feedback augmenté puissant lorsqu'une même coordination est produite de façon répétée dans le cadre d'un apprentissage. Que ce soit dans le contexte d'un test ou d'un apprentissage, la figure de Lissajous garantit que le participant essaye de produire la coordination souhaitée par l'expérimentateur.

Dans un premier temps (expérimentation 3), nous mettons de côté la question de l'apprentissage afin d'investiguer la dynamique de coordination posturale en présence d'une information comportementale. Pour cela, nous utilisons la méthode du balayage : 16 phases relatives hanche-cheville différentes sont testées, par intervalle régulier, sur l'ensemble des coordinations possibles. Cette méthode permet de mettre au jour les inégalités de performance qui existent entre les différents patrons posturaux, ainsi que les états attracteurs de la dynamique du système. Par exemple, lorsque dans un certain intervalle de phases relatives requises, les participants ont tendance à produire une phase relative fixe, un mode attracteur est mis en évidence. Dans un deuxième temps (expérimentation 4), nous revenons à la question de l'apprentissage : après nous être intéressés aux interactions entre l'apprentissage et les coordinations spontanées (expérimentations 1 et 2), nous étudions l'interaction entre l'apprentissage et les coordinations requises par une information comportementale. Pour cela, quatre patrons hanche-cheville apparaissant comme fondamentaux ont été testés avant et après l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination : les patrons intrinsèques en phase et en anti-phase ( $\phi_{rel} = 20^\circ$  et  $\phi_{rel} = 180^\circ$ ), le patron appris ( $\phi_{rel} = 90^\circ$ ), et le patron symétrique au patron appris ( $\phi_{rel} = 270^\circ$ ). Pour finir, l'expérimentation 5 analyse conjointement les

---

<sup>8</sup> Contrairement aux doigts, aux mains ou aux bras, il est peu commun d'avoir l'intention de produire une coordination particulière au niveau des hanches et des chevilles, celle-ci émergeant toujours de la réalisation de buts supra-posturaux.

conséquences de l'apprentissage d'un nouveau mode sur les coordinations spontanées et requises. Les participants sont testés à la fois sur la tâche de poursuite de cible (tâche supraposturale faisant émerger les patrons de coordination spontanés) et lors d'un balayage (patrons requis par information comportementale sur l'ensemble du diagramme de phase).

### 3.1. Expérimentation 3

#### 3.1.1. Introduction

Nous avons vu précédemment que, parmi l'ensemble des patrons de coordination hanche-cheville possibles, les modes en phase et en anti-phase étaient les seuls patrons de coordination à être produits initialement (i.e., sans qu'il y ai eu d'apprentissage) lors de la tâche de poursuite de cible. Les travaux menés jusqu'à présent par Bardy et ses collaborateurs se sont centrés sur les contraintes influençant la stabilité de ces deux modes, ainsi que sur leur transition lors de la variation d'un paramètre de contrôle (e.g., Bardy et al., 1999, 2002). De la même façon, concernant l'étude des coordinations bi-manuelles, peu d'expérimentations ont investigué la production de modes différents des patrons intrinsèques. Les premiers travaux ayant étudié la performance différentielle des diverses coordinations bi-manuelles possibles ont été menés par Yamanishi et al. (1980). Dans cette expérimentation la dynamique de coordination bi-manuelle est analysée grâce à un *balayage* : les participants doivent produire successivement dix phases relatives différentes, variant de  $0^\circ$  à  $324^\circ$  par étape de  $36^\circ$ , entre la frappe des index droit et gauche. Chaque essai débute en présence d'un métronome visuel spécifiant la phase relative à produire (le participant doit coordonner la frappe de l'index avec le signal ipsi-latéral) et termine sans ce signal (le participant doit continuer à produire la phase relative requise). Les résultats montrent que les patrons en phase et en anti-phase sont les plus précis et les plus stables, mais surtout que les patrons voisins sont attirés vers ces modes intrinsèques. Autrement dit, les participants ont tendance à produire les patrons en phase et en anti-phase lorsque des patrons de coordination proches sont requis. Ces résultats ont été reproduits par Tuller et Kelso (1989) avec une tâche similaire, mais en présence des métronomes visuels durant tout l'essai, ainsi que par Zanone et Kelso (e.g., 1992a, 1997), avec une tâche de flexion-extension des index.

L'expérimentation 3 vise à explorer la dynamique de coordination du système postural en balayant étape par étape, l'ensemble de la gamme des patrons hanche-cheville. Les

participants réalisent 16 patrons de coordination posturaux différents, allant de phases relatives de  $0^\circ$  à  $337.5^\circ$  entre les hanches et les chevilles (étapes de  $22.5^\circ$ ). Afin d'analyser le rôle du feedback augmenté sur la production et la stabilité des patrons de coordination, chaque mode hanche-cheville requis est testé dans deux conditions. Tout d'abord, un feedback visuel, fourni sous forme de figure de Lissajous, permet au participant de visualiser l'écart entre la coordination qu'il produit, et celle qui est requise. Ensuite, le participant tente de maintenir la coordination requise sans feedback visuel. De nombreuses études ont montré qu'un feedback augmenté approprié permettait l'exécution de patrons de coordination habituellement irréalisables (e.g., Mechsner et al., 2001 ; Swinnen et al., 1997). La mise en place de deux conditions de réalisation nous permet d'investiguer cette question pour le système postural. A partir des résultats précédemment obtenus sur la dynamique de coordination posturale (e.g., Bardy et al., 1999, 2002), et de leurs similitudes avec la dynamique de coordination bi-manuelle (e.g., Kelso, 1984), nous pouvons attendre : (i) une meilleure performance pour les patrons de coordination intrinsèques (en phase et en anti-phase), (ii) une attraction des autres modes de coordination vers ces patrons intrinsèques, et (iii) une meilleure performance en présence du feedback augmenté qu'en son absence.

### 3.1.2. Méthode

#### **3.1.2.1. Participants**

Quatorze étudiants de l'Université de Paris Sud 11 (9 garçons et 5 filles) d'un âge moyen de 22 ans prennent part de façon bénévole à l'expérimentation. Tous sont naïfs par rapports aux objectifs de l'étude et participent pour la première fois à une expérimentation sur les coordinations posturales. Ils ne rapportent aucun défaut visuel (vision normale ou corrigée), ni de trouble de l'équilibre. Huit participants constituent le groupe expérimental, et six, le groupe contrôle. La taille et le poids moyen sont de 172.4 cm ( $ET = 9.8$ ) et 65.4 kg ( $ET = 11.4$ ) pour le groupe expérimental, et de 174.2 cm ( $ET = 7.67$ ) et 66.3 kg ( $ET = 8.2$ ) pour le groupe contrôle.

#### **3.1.2.2. Tâches et Dispositif expérimental**

Les participants (groupe expérimental et contrôle) se tiennent debout, pieds nus écartés à largeur des hanches, et mains jointes dans le dos. Deux électro-goniomètres sont positionnés sur le coté gauche des participants, de façon à mesurer les mouvements angulaires des

hanches et des chevilles dans le plan antéropostérieur. L'électro-goniomètre de la hanche est placé sur la face externe, de la crête iliaque au grand trochanter, et celui de la cheville, sur la face antérieure, du deuxième métatarse au tiers inférieur du tibia. Les données des électro-goniomètres sont acquises à une fréquence de 0.50 Hz sur un ordinateur PC, à partir de l'interface d'acquisition Datalink (Biometrics, Inc.). Leur précision est de 1°.

*Groupe expérimental.*

On demande aux participants du groupe expérimental de produire 16 phases relatives hanche-cheville (0° - 22.5° - 45° - 67.5° - 90° - 112.5° - 135° - 157.5° - 180° - 202.5° - 225° - 247.5° - 270° - 292.5° - 315° - 337.5°). Face aux participants, à une distance de 1.50 m, se trouve un écran de 3 m H x 2 m V, sur lequel est rétroprojetée une image de 0.82 m x 0.82 m. Pour chaque phase relative requise, le patron de coordination est présenté sur cette image sous la forme d'une figure de Lissajous, où la position angulaire des hanches correspond à l'axe des abscisses, et celle des chevilles, à l'axe des ordonnées. Deux types d'informations sont disponibles sur cette figure : d'une part, la phase relative qui est requise (modèle à suivre), et d'autre part, les données des électro-goniomètres des hanches et des chevilles, tracées en temps réel (Figure 3.1.). Les participants disposent donc d'un feedback augmenté qui leur permet de visualiser l'écart entre la coordination hanche-cheville qu'ils produisent et celle qui est demandée. Les participants du groupe expérimental réalisent deux essais de 30 cycles d'oscillation hanche-cheville pour chacune des 16 phases relatives requises. Pour le premier essai, la figure de Lissajous est disponible (condition *avec feedback*), alors que le deuxième essai, qui suit immédiatement le premier, est réalisé les yeux bandés (condition *sans feedback*). L'amplitude de chaque phase relative "modèle" est de 8° pour les hanches et de 8° pour les chevilles. Nous nous sommes assurés par le calcul des positions extrêmes du centre de masse que des amplitudes de 8° au niveau des hanches et des chevilles permettraient de rester debout quelque soit le mode de coordination hanches-chevilles adopté. La fréquence d'oscillation est laissée libre, les participants n'ont donc pas de limite de temps pour réaliser les essais.

*Groupe contrôle.*

Les participants du groupe contrôle doivent produire les mêmes phases relatives que le groupe expérimental, mais ne disposent à aucun moment du feedback sous forme de figure de Lissajous. Ils réalisent donc uniquement l'essai sans feedback, pour chacun des 16 patrons requis. Avant chaque essai, le patron à produire est présenté grâce à une figure animée

simulant une personne de profil en train de réaliser la phase relative hanche-cheville demandée. Le groupe contrôle permet d'évaluer les effets d'ordre (condition avec feedback suivie de la condition sans feedback pour le groupe expérimental) et de fatigue.

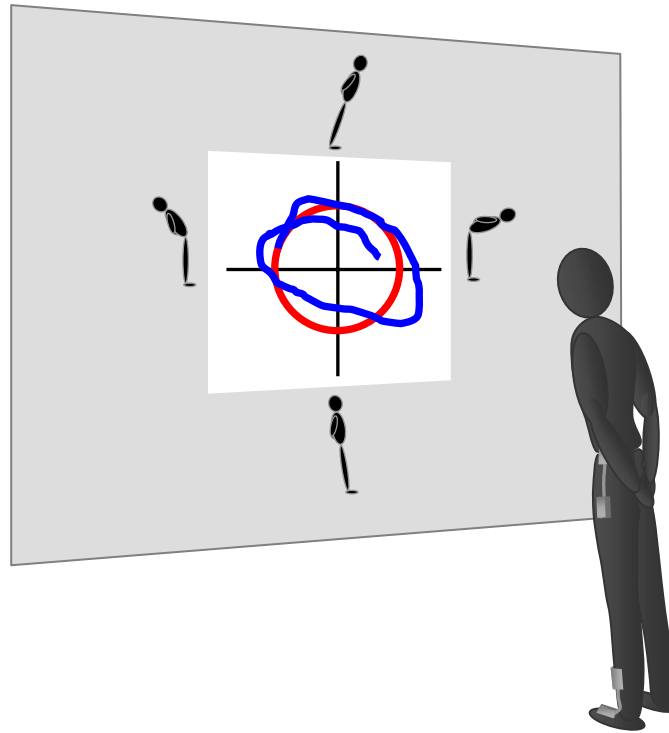


Figure 3.1. Dispositif pour le groupe expérimental de l'expérimentation 3. Les participants doivent faire correspondre leur coordination hanche-cheville (tracé bleu) au patron requis (forme rouge). Dans cet exemple, la phase relative requise est de  $90^\circ$  si le cercle est tracé dans le sens des aiguilles d'une montre, ou de  $270^\circ$  s'il est tracé en sens inverse.

### 3.1.2.3. Protocole

Le groupe expérimental est testé sur deux sessions quotidiennes de 90 minutes environ, et le groupe contrôle, sur une seule session d'une durée identique. Pour les deux groupes, les 16 phases relatives requises sont présentées de façon randomisée afin de minimiser les effets d'ordre de passation des différents patrons. Au début du premier jour, les participants du groupe expérimental disposent d'une période de familiarisation de 15 minutes avec le dispositif (feedback augmenté), afin de faire le lien entre les conséquences graphiques et leurs propres mouvements. Durant cette phase, l'expérimentateur explique le principe de la

figure de Lissajous : "les axes présentés sur l'écran correspondent chacun au mouvement de flexion-extension d'une articulation. Le mouvement des hanches est représenté horizontalement, et le mouvement des chevilles verticalement. Pour les deux articulations, les valeurs positives correspondent à une flexion, et les valeurs négatives à une extension de l'articulation." Ensuite, le participant doit produire 10 oscillations avec les hanches, alors que les chevilles restent fixes (ce qui se traduit théoriquement par des allers-retours horizontaux sur l'écran), puis 10 oscillations avec les chevilles, les hanches étant maintenant fixées (ce qui se traduit théoriquement par des allers-retours verticaux). La conséquence de ces mouvements mono-articulaires est présentée au participant sur papier, de façon identique à la Figure 3.2.

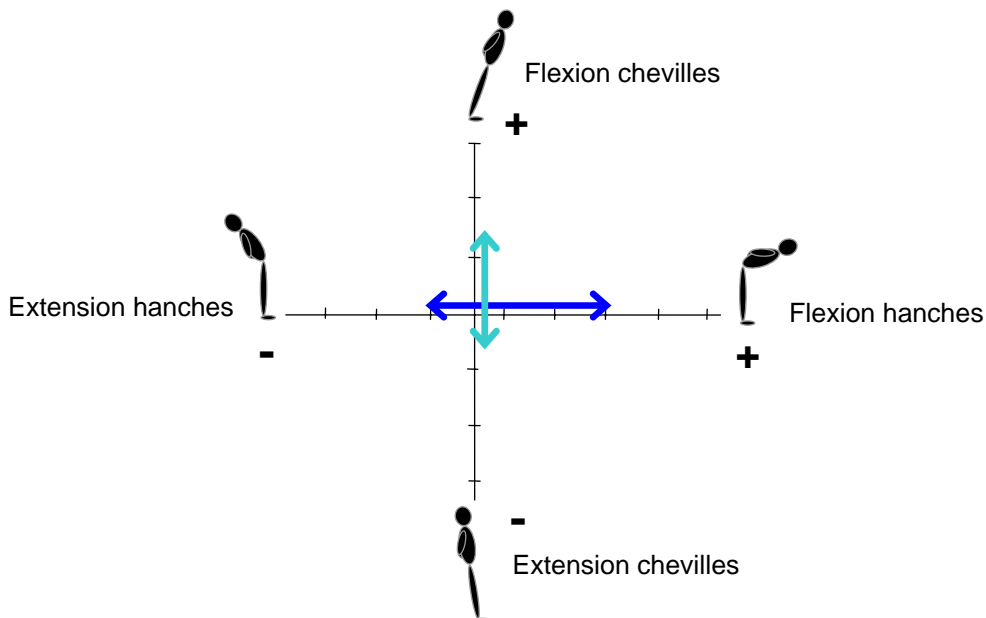


Figure 3.2. Figure présentée sur papier au participant, correspondant à la conséquence des mouvements mono-articulaires demandés lors de la tâche de familiarisation. Le tracé doit être soit horizontal (mouvement des hanches), soit vertical (mouvement des chevilles), quelque soit sa position dans l'espace hanche-cheville.

Cette première tâche de familiarisation est l'occasion pour l'expérimentateur de mesurer la position articulaire autour de laquelle les participants oscillent pour les hanches et les chevilles. En effet, des expérimentations préliminaires ont révélé d'importantes différences entre les individus, sur la zone de l'espace hanche-cheville dans laquelle ils préfèrent osciller. Par exemple, certains participants oscillent entre des positions angulaires de  $+5^\circ$  et  $+20^\circ$  au



niveau des hanches (i.e., autour de  $12.5^\circ$ ), alors que d'autres oscillent entre  $-5^\circ$  et  $5^\circ$  (i.e., autour de  $0^\circ$ ). Afin de centrer par la suite les figures de Lissajous que les participants devront reproduire, nous calculons pour chaque participant, la position centrale autour de laquelle il oscille pour les hanches et les chevilles :

$$C_{\text{hanches}} = \alpha_{\text{max}} - A_{\text{hanches}} / 2 \quad (6)$$

$$C_{\text{chevilles}} = \beta_{\text{max}} - A_{\text{chevilles}} / 2 \quad (7)$$

avec l'amplitude  $A$  correspondant à la différence entre la position angulaire maximale ( $\alpha_{\text{max}}$  et  $\beta_{\text{max}}$  pour les hanches et les chevilles, respectivement) et la position angulaire minimale lors de la tâche de familiarisation. Toutes les figures de Lissajous sont centrées autour de  $C_{\text{hanches}}$  et de  $C_{\text{chevilles}}$  pour la suite de l'expérimentation, ce qui permet aux participants de réaliser les différentes coordinations de façon confortable.

Après cette première tâche de familiarisation (produire 10 oscillations uniquement avec les hanches, puis uniquement avec les chevilles), les participants réalisent une deuxième tâche dont le but est de produire une forme rectangulaire dans l'espace hanche-cheville en repassant 3 fois de suite sur chaque côté. Les deux tâches de familiarisation ont pour but de faire comprendre au sujet le lien entre ses propres mouvements et les conséquences graphiques qui lui sont présentées.

#### 3.1.2.4. Variables dépendantes

Les données des électro-goniomètres sont en premier lieu filtrées grâce à un filtre passe-bas (fréquence de coupure de 2 Hz), puis le premier cycle de mouvement de chaque essai, durant lequel les participants se positionnent dans l'espace hanche-cheville, est exclu des analyses. Cinq variables dépendantes sont ensuite calculées : (i) la phase relative,  $\phi_{\text{rel}}$ , entre les hanches et les chevilles, (ii) l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{\text{rel}}$ , (iii) l'erreur constante,  $EC$ , (iv) l'erreur absolue,  $EA$ , et (v) l'amplitude articulaire des hanches et des chevilles (i.e., la différence entre la position angulaire maximale et la position angulaire minimale, calculée pour chaque cycle de mouvement). Comme dans les expérimentations 1 et 2, la phase relative hanche-cheville est calculée de façon ponctuelle, à partir des pics de flexion des hanches et des chevilles pour chaque cycle de mouvement. Une valeur de phase relative comprise entre  $0^\circ$  et  $180^\circ$  indique que les chevilles mènent le mouvement des hanches. Pour chaque essai, l'écart-type circulaire de la phase relative,  $ET\phi_{\text{rel}}$ , indicateur de stabilité, est calculé à partir des phases relatives par cycle. L'erreur constante ( $EC$ ) et l'erreur

absolue ( $EA$ ) sont calculées pour chaque cycle de mouvement. L'erreur constante correspond à la différence entre la phase relative produite et la phase relative requise. Elle est calculée de façon à prendre en compte la circularité des données, sa valeur absolue est donc minimale et toujours inférieure à  $180^\circ$ . Par exemple, si une phase relative de  $350^\circ$  (i.e.,  $-10^\circ$ ) est produite alors qu'un patron de  $90^\circ$  est requis, l'erreur constante sera de  $-100^\circ$  (i.e.,  $EC = -10^\circ - 90^\circ$ ) et non de  $260^\circ$  (i.e.,  $EC = 350^\circ - 90^\circ$ ). L'erreur constante indique la direction de l'erreur produite par le participant. Une valeur positive de  $EC$  indique une surestimation de la phase relative à produire et une valeur négative une sous-estimation. L'erreur absolue correspond à la valeur absolue de l'erreur constante par cycle. Elle donne l'importance de l'erreur.

Nous utilisons des statistiques circulaires pour calculer les valeurs moyennes, l'écart-type et l'intervalle de confiance à 95% (Batschelet, 1981 ; Mardia, 1972) pour l'ensemble de nos variables dépendantes ( $\phi_{rel}$ ,  $ET\phi_{rel}$ ,  $EC$ ,  $EA$  et amplitude articulaire). Pour  $ET\phi_{rel}$ ,  $EC$ ,  $EA$ , et l'amplitude articulaire, les étendues des valeurs sont inférieures à  $180^\circ$  pour une même phase relative requise, nous pouvons donc analyser ces variables avec des ANOVAs linéaires.

### 3.1.3. Résultats

Les phases relatives moyennes produites et leurs intervalles de confiance à 95% sont représentés sur la Figure 3.3. pour chacun des 16 patrons requis. A deux exceptions près ( $22.5^\circ$  requis, condition avec feedback ;  $180^\circ$  requis, groupe contrôle), l'intervalle de confiance à 95% ne contient jamais la phase relative requise, ce qui montre la difficulté de produire précisément les patrons demandés, que le feedback soit présent ou non. Néanmoins, pour les valeurs les plus basses de phase relative requise, l'intervalle de confiance à 95% contient souvent la valeur requise d'un patron supérieur. Par exemple, pour le groupe expérimental en condition avec feedback, l'intervalle de confiance à 95% contient la phase relative de  $112.5^\circ$  lorsque  $90^\circ$  est requis, et la phase relative de  $90^\circ$  lorsque  $45^\circ$  est requis. Lorsque les valeurs de phase relative requises deviennent supérieures à  $157.5^\circ$  (groupe expérimental) ou  $202.5^\circ$  (groupe contrôle), l'intervalle de confiance contient parfois des phases relatives requises qui sont inférieures à celle qui est actuellement demandée. La surestimation de la phase relative exigée en dessous de  $180^\circ$  et sa sous-estimation pour des valeurs supérieures indiquent une attraction du patron en anti-phase sur les autres modes de coordination. Les patrons compris entre  $270^\circ$  et  $0^\circ$  semblent être les plus difficiles à produire.

En effet, aucun intervalle de confiance à 95% ne contient ces phases relatives requises, quelque soit le patron requis, la condition, et le groupe.

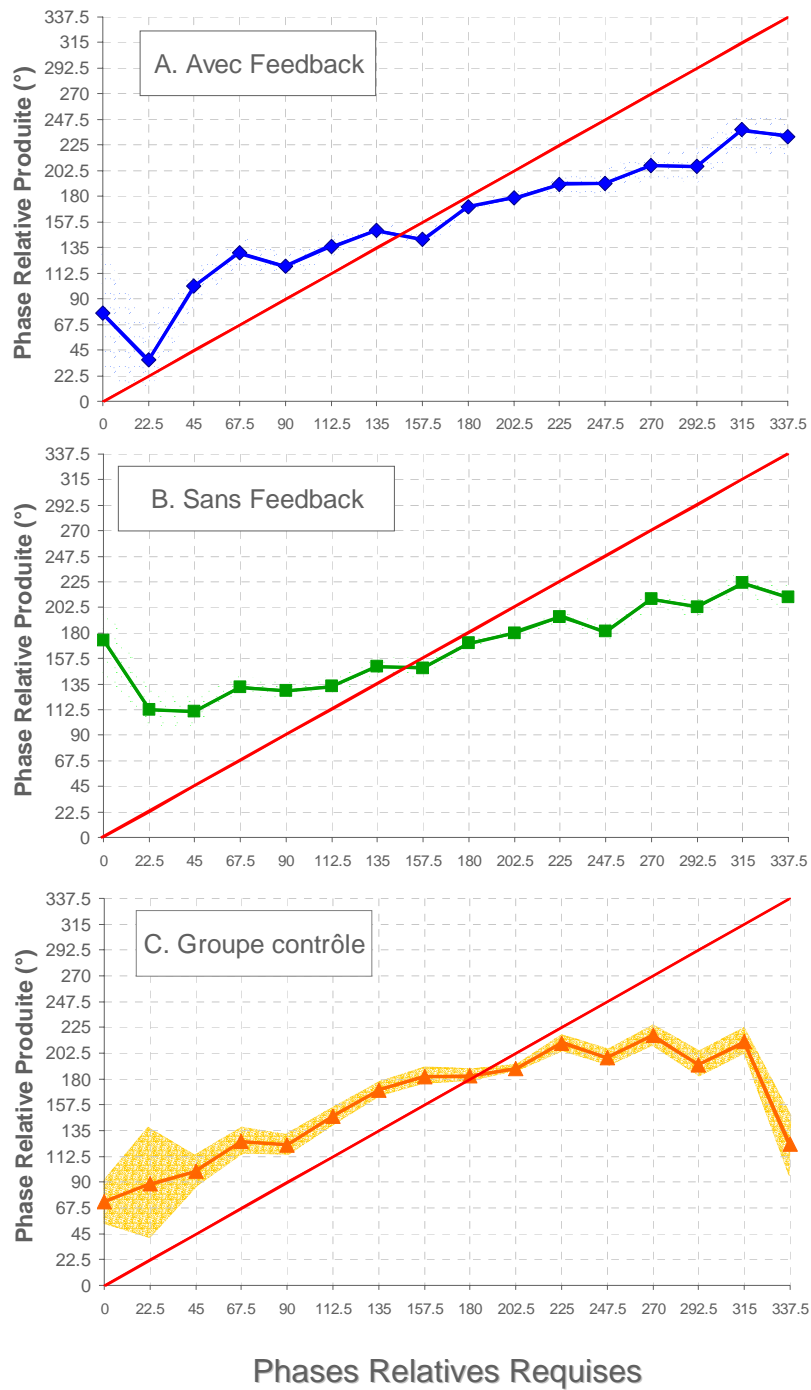


Figure 3.3. Phases relatives moyennes produites (courbes avec les symboles) et leurs intervalles de confiance à 95% (aires colorées) en fonction de la phase relative requise. La droite rouge  $y = x$  indique une performance théorique parfaite. A : Groupe expérimental, condition avec feedback. B : Groupe expérimental, condition sans feedback. C : Groupe contrôle (condition sans feedback).

*Groupe expérimental vs. contrôle.*

Etant donné que les essais sans feedback visuel suivaient systématiquement les essais avec feedback visuel pour le groupe expérimental, nous pouvions nous attendre à des effets d'ordre et/ou de fatigue sur la dynamique de coordination posturale. La comparaison entre le groupe contrôle et le groupe expérimental (Figure 3.4.) permet de garantir que les effets observés pour le groupe expérimental pourront être attribués aux manipulations expérimentales (condition de feedback et patron requis). Pour  $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ , nous effectuons des ANOVAs Patron (16)  $\times$  Groupe (contrôle vs. expérimental, condition sans feedback uniquement) avec des mesures répétées sur le premier facteur. Pour l'erreur constante, l'ANOVA révèle un effet du Patron,  $F(15, 180) = 11.28$ ,  $p < .05$ , mais pas d'effet du Groupe,  $F(1, 12) = 1.92$ ,  $ns$ , ou d'interaction Patron  $\times$  Groupe,  $F(15, 180) < 1$ ,  $ns$ . De la même façon, pour l'erreur absolue, l'effet principal du Patron est significatif,  $F(15, 180) = 20.55$ ,  $p < .05$ , ce qui n'est pas le cas de l'effet principal du Groupe,  $F(1, 12) < 1$ ,  $ns$ , et de l'interaction Patron  $\times$  Groupe,  $F(15, 180) < 1$ ,  $ns$ . Pour l'écart-type de la phase relative, l'effet principal du Patron est également significatif,  $F(15, 180) = 9.55$ ,  $p < .05$ , contrairement à l'effet principal du Groupe,  $F(1, 12) = 1.19$ ,  $ns$ , et à l'interaction,  $F(15, 180) < 1$ ,  $ns$ . Ces résultats confirment qu'il n'y a pas d'effet d'ordre et/ou de fatigue : l'exécution des patrons de coordination avec feedback visuel n'influe pas sur la condition sans feedback subséquente.

*Groupe expérimental.*

Les valeurs moyennes de  $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$  pour chaque patron requis sont représentées Figure 3.4. pour les groupes expérimental et contrôle. Nous pouvons constater trois résultats principaux : (i) la précision et la stabilité les plus importantes sont observées pour des valeurs de phase relative requises de  $180^\circ$ - $202.5^\circ$ , (ii) le groupe expérimental présente une dynamique de coordination comparable avec et sans feedback, (iii) de même que les groupes expérimental et contrôle en condition sans feedback. Pour le groupe expérimental, nous effectuons des ANOVAs avec mesures répétées Patron (16)  $\times$  Condition (2) sur  $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ . Pour l'erreur constante (Figure 3.4.A), l'effet principal du Patron est significatif,  $F(15, 105) = 9.75$ ,  $p < .05$ , mais pas l'effet du facteur Condition ni de l'interaction Patron  $\times$  Condition ( $F_s < 1$ ,  $ns$ ). Pour l'erreur absolue (Figure 3.4.B), l'ANOVA révèle également un effet principal du Patron,  $F(15, 105) = 20.90$ ,  $p < .05$ , sans effet du facteur Condition et de l'interaction ( $F_s < 1.55$ ,  $ns$ ). Pour l'écart-type de la phase relative (Figure 3.4.C), l'effet principal du Patron est significatif,  $F(15, 105) = 9.86$ ,  $p < .05$ . L'effet principal du facteur

Condition est également significatif,  $F(1, 7) = 23.03$ ,  $p < .05$ , dans le sens d'une meilleure stabilité pour la condition sans feedback ( $ET\phi_{rel} = 41.50^\circ$ ) que pour la condition avec feedback ( $ET\phi_{rel} = 48.68^\circ$ ). L'interaction Patron  $\times$  Condition n'est pas significative,  $F(15, 105) < 1$ , *ns*. Ces analyses confirment une performance différentielle entre les différents patrons de coordination. Cette inégalité de performance se traduit par une attraction vers le patron en anti-phase sur l'ensemble des patrons de coordination testés, qui se visualise notamment par la pente négative de l'erreur constante sur la Figure 3.4.A. Les valeurs minimales de  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$  apparaissent pour une phase relative *requis* de  $202.5^\circ$  et non  $180^\circ$  (Figure 3.4.B et 3.4.C), mais pour ce patron requis, la phase relative réellement *produite* est de  $178.5^\circ$  en moyenne (voir la Figure 3.3.), autrement dit, une valeur très proche de celle observée par Bardy et al. sur les coordinations spontanées (e.g., 1999, 2002).

Afin d'observer s'il y a un effet de l'ordre du mouvement des articulations sur la performance, nous comparons les patrons requis pour lesquels le mouvement des chevilles est en avance sur les hanches (phases relatives requises de  $22.5^\circ$  à  $157.5^\circ$ ) à ceux pour lesquels le mouvement des hanches mène le mouvement des chevilles (de  $202.5^\circ$  à  $337.5^\circ$ ). Sur la figure de Lissajous, l'articulation menant le mouvement détermine le sens de rotation : dans le sens des aiguilles d'une montre pour les patrons menés par les chevilles, et dans le sens inverse pour les patrons menés par les hanches. Pour le groupe expérimental (conditions avec et sans feedback), nous effectuons des comparaisons planifiées pour  $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ . L'analyse montre que l'erreur constante est significativement plus basse pour les patrons menés par les chevilles que pour ceux menés par les hanches,  $F(1, 7) = 97.95$ ,  $p < .05$ . D'autre part, les participants ont tendance à surestimer la phase relative requise lorsque les chevilles mènent ( $EC = 21.06^\circ$ ) et à la sous-estimer lorsque les hanches mènent ( $EC = -60.56^\circ$ ). Concernant l'erreur absolue, les valeurs sont plus faibles pour les patrons menés par les chevilles ( $EA = 58.18^\circ$ ), que pour les patrons menés par les hanches ( $EA = 70.01^\circ$ ),  $F(1, 7) = 12.44$ ,  $p < .05$ . Lorsque les chevilles mènent, l'écart-type de la phase relative est de  $47.40^\circ$ , alors qu'il est de  $42.36^\circ$  lorsque le mouvement est mené par les hanches ; la différence n'est pas significative,  $F(1, 7) = 2.51$ , *ns*. Ces analyses révèlent une précision supérieure pour les patrons menés par les chevilles au regard de ceux menés par les hanches, sans qu'il y ait de différence de stabilité.

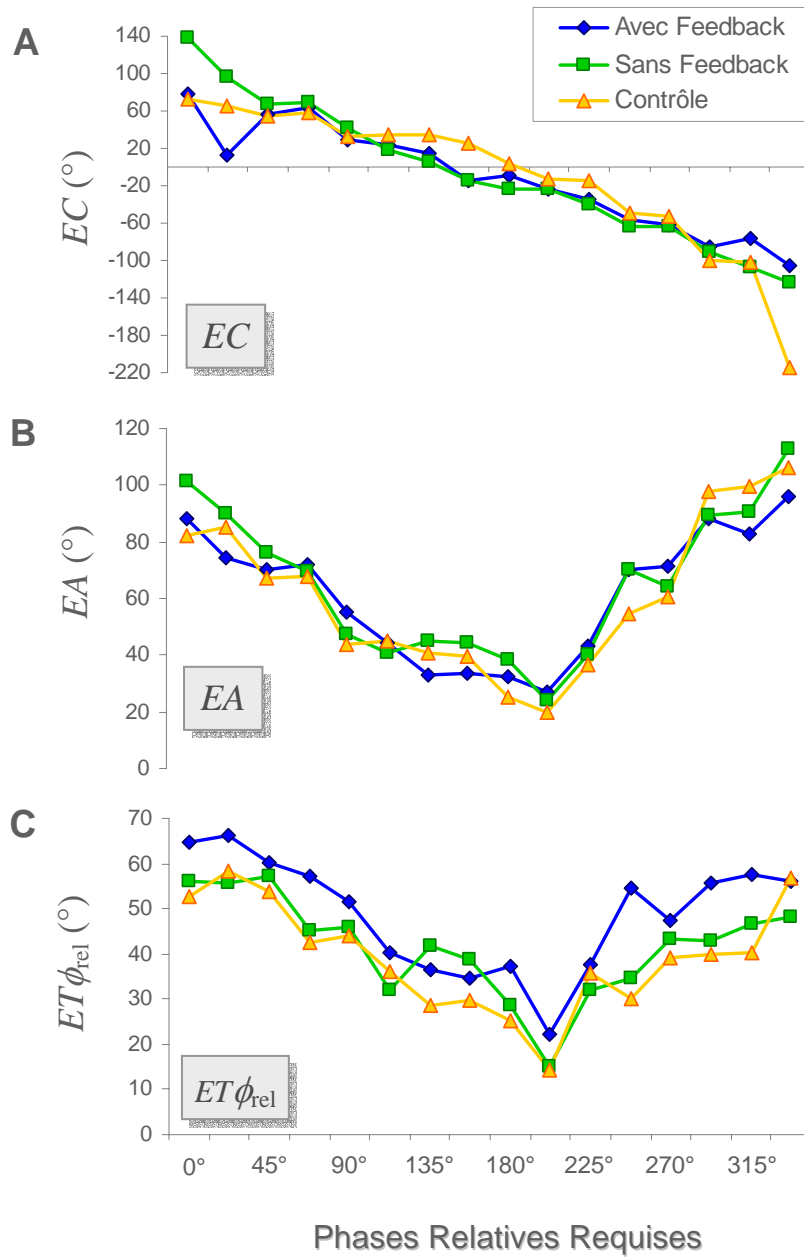


Figure 3.4. Variables caractérisant le patron de coordination produit en fonction de la phase relative requise pour le groupe expérimental (condition avec feedback et sans feedback) et pour le groupe contrôle (condition sans feedback). A : Erreur constante, EC, indiquant la direction de l'erreur. B : Erreur absolue, EA, indiquant l'importance de l'erreur. C : Ecart-type de la phase relative  $ET\phi_{rel}$ , indiquant la stabilité du patron produit.

*Amplitude des articulations.*

Les données des amplitudes articulaires sont présentées Figure 3.5. pour le groupe expérimental. Nous analysons ces données grâce à des ANOVAs à deux facteurs de mesures répétées Patron (16) × Condition (avec feedback vs. sans feedback). Pour l'amplitude des hanches, l'effet principal du Patron est significatif,  $F(15, 105) = 8.17, p < .05$ , de même que l'effet principal du facteur Condition,  $F(1, 7) = 10.13, p < .05$ . L'amplitude des hanches est supérieure dans la condition sans feedback (moyenne de  $13.33^\circ$ ) que dans la condition avec feedback (moyenne de  $10.21^\circ$ ). L'interaction Patron × Condition n'est pas significative,  $F(15, 105) = 1.10, ns$ . Concernant l'amplitude des chevilles, l'effet principal du Patron est significatif,  $F(15, 105) = 4.17, p < .05$ , ce qui n'est pas le cas pour le facteur Condition,  $F(1, 7) = 3.39, ns$ , et pour l'interaction,  $F(15, 105) = 1.17, ns$ . Ces résultats indiquent une différence d'amplitude articulaire en fonction du patron requis : l'amplitude du mouvement augmente pour les deux articulations lorsque les patrons requis s'approchent de l'anti-phase (Figure 3.5.). D'autre part, l'amplitude des hanches est plus importante dans la condition sans feedback que dans la condition avec feedback.

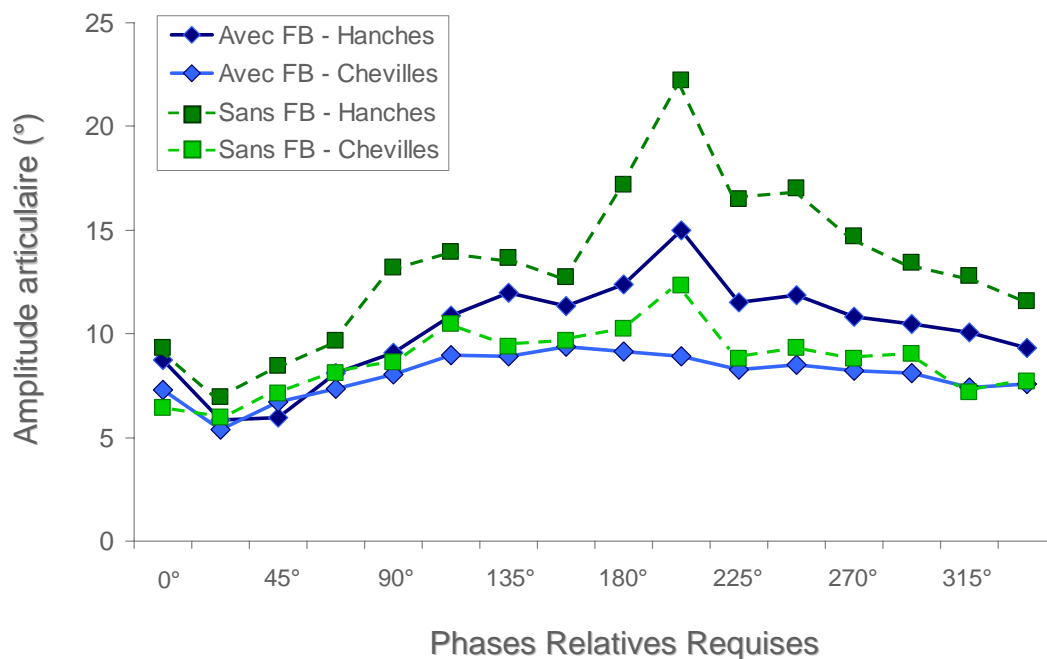


Figure 3.5. Amplitude articulaire moyenne des hanches et des chevilles en fonction de la phase relative requise pour le groupe expérimental, avec et sans feedback (FB).

### 3.1.4. Discussion

L'ensemble des résultats révèle une influence générale de la valeur de phase relative requise sur la performance de la coordination produite. Les variables caractérisant la coordination ( $\phi_{rel}$ ,  $ET\phi_{rel}$ ,  $EC$  et  $EA$ ) indiquent que les participants ont tendance à surestimer la phase relative requise pour les valeurs inférieures à l'intervalle  $[157.5^\circ ; 202.5^\circ]$ , et à sous-estimer les patrons supérieurs à ces valeurs. Cette tendance, qui se traduit par une pente négative de l'erreur constante sur l'ensemble du balayage, met en évidence la présence d'un attracteur unique autour de l'anti-phase, qui attire les phases relatives produites vers sa valeur lorsque d'autres patrons de coordination sont requis. De plus, nous avons observé une meilleure précision ( $EC$  et  $EA$  plus faibles) lorsque les phases relatives requises impliquent une avance des chevilles (figure de Lissajous tracée dans le sens horaire), que lorsqu'elles impliquent une avance des hanches (figure de Lissajous tracée dans le sens anti-horaire). Ce résultat illustre la nature asymétrique de la dynamique de coordination posturale.

#### *Le rôle du feedback visuel (figure de Lissajous).*

Les expérimentations ayant étudié l'influence d'un feedback visuel augmenté pour des tâches bi-manuelles (e.g., Mechsner et al., 2001 ; Swinnen et al., 1997) laissaient augurer une meilleure performance de la coordination hanche-cheville dans la condition avec feedback. Néanmoins, nous avons constaté une performance similaire avec ou sans feedback et, même, une stabilité plus importante sans feedback. Etant donné que le groupe expérimental en condition sans feedback ne diffère pas du groupe contrôle, nous ne pouvons pas expliquer ce résultat par le fait que la condition sans feedback soit réalisée après la condition avec feedback. La plus grande variabilité en condition avec feedback peut indiquer que le modèle sur la figure de Lissajous contraint l'amplitude des articulations de façon trop rigide par rapport à la condition sans feedback. La différence d'amplitude de hanche entre les deux conditions semble être en faveur de cette hypothèse. Dans tous les cas, le feedback visuel n'a pas joué le rôle bénéfique auquel nous nous attendions. L'absence d'interaction entre le patron requis et la condition de feedback suggère une dynamique de coordination posturale commune dans les deux conditions.

#### *Un attracteur postural unique.*

Le patron de coordination en anti-phase est le seul à apparaître de façon précise et stable parmi l'ensemble des modes testés. Ce résultat contraste avec les études précédentes



pour lesquelles un patron en phase entre les hanches et les chevilles (autour de  $0^\circ - 45^\circ$ ) est observé de façon systématique et stable pour de nombreuses conditions de réalisation (e.g., Bardy et al. 1999, 2002 ; Oullier et al., 2002). Pourquoi n'observons-nous pas un mode en phase performant dans cette expérimentation ? Peut-être que les propriétés de la coordination imposée sont différentes de celles du patron en phase spontané observé dans les expérimentations précédentes. Un effet de la fréquence est improbable étant donné que celle-ci est laissée libre lors du balayage. Un effet de l'amplitude semble plus vraisemblable. Pour le patron requis de  $22.5^\circ$ , l'amplitude des hanches et des chevilles ( $5.84^\circ$  pour les hanches et  $5.40^\circ$  pour les chevilles dans la condition avec feedback) est plus importante que celle observée par Bardy et al. (1999) pour le patron en phase spontané ( $3.97^\circ$  pour les hanches et  $4.30^\circ$  pour les chevilles). Néanmoins, l'absence du mode en phase dans la condition sans feedback – ainsi que l'absence d'interaction significative entre le patron requis et la condition de feedback pour  $EC$ ,  $EA$ , et  $ET\phi_{rel}$  – suggère que la dynamique de coordination ne diffère pas lorsque l'amplitude de mouvement est imposée (avec feedback) ou laissée libre (sans feedback) : dans les deux cas, le mode en phase n'est pas produit de façon performante.

Une explication plus plausible est la différence de tâche utilisée entre les expérimentations précédentes et la présente étude. Lors du balayage, la coordination hanche-cheville est imposée et constitue le but de la tâche pour les participants. Dans les études précédentes, le but des participants était de suivre les mouvements antéropostérieurs virtuels d'une cible avec la tête (but supra-postural). La coordination hanche-cheville *émerge* de la réalisation de cette tâche sans être imposée. De façon quelque peu paradoxale, il a été montré que le fait de centrer l'attention sur la coordination (centre d'attention interne) pouvait perturber un comportement naturellement réalisé lorsque le centre d'attention est externe (e.g., Hodges & Franks, 2002 ; Lee, 2004 ; Wulf & Prinz, 2001). Wulf et Prinz (2001) montrent que lorsqu'on demande aux participants de se concentrer sur les conséquences environnementales de leurs mouvements, la performance est meilleure que dans le cas où ils portent l'attention sur le mouvement lui-même. De la même façon, Hodges et Franks (2002) suggèrent que des instructions explicites peuvent mener le participant à exercer un contrôle conscient sur des processus qui sont habituellement contrôlés par "des niveaux du système moteur plus bas, moins cognitifs" (p. 231). Ainsi, des instructions portant l'attention sur un but différent de la relation de phase entre les segments coordonnés peuvent favoriser la production de certaines coordinations. Peut être que le patron de coordination en phase suit cette ligne de conduite.

En conclusion, nos résultats indiquent qu'il n'y a pas de correspondance directe entre la dynamique de coordination posturale *imposée* (relation de phase spécifiée par information comportementale), et la dynamique de coordination posturale *spontanée* (émergence de la relation de phase à partir d'un but supra-postural). La dynamique de coordination mise au jour grâce à la méthode de balayage nous pousse à nous intéresser plus précisément à la relation qui lie l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination et la performance de patrons requis par information comportementale. Cette question constitue l'objectif de l'expérimentation 4.

## 3.2. Expérimentation 4

### 3.2.1. Introduction

En démontrant l'absence du mode attracteur en phase lorsqu'il est imposé, l'expérimentation 3 révèle une divergence principale entre les dynamiques de coordination requise et spontanée. Dans l'expérimentation 4, nous revenons au problème de l'apprentissage, en nous demandant si les conséquences de l'acquisition d'une nouvelle habileté, précédemment observées sur des modes spontanés, trouveront leur reflet lorsque les patrons de coordination sont requis. Pour cela, nous utilisons un dispositif expérimental identique à celui de l'expérimentation 3 (feedback augmenté sous forme de figure de Lissajous). En référence à nos résultats précédents sur les coordinations spontanées (expérimentations 1 et 2) et aux études menées sur les coordinations bi-manuelles (e.g., Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a ; 1997), nous pouvons faire l'hypothèse d'une déstabilisation des patrons posturaux intrinsèques en conséquence de la pratique d'un nouveau mode de coordination. Néanmoins, d'après les résultats de l'expérimentation 3, nous ne nous attendons pas à voir apparaître le patron en phase de façon stable. Les conséquences de l'apprentissage sont donc particulièrement attendues sur le mode en anti-phase. D'autre part, la bifurcation du patron spontané de deux participants de l'expérimentation 2 vers le mode symétrique au patron appris (i.e., relation de phase identique mais avec un ordre inverse entre le mouvement des articulations) nous encourage à tester l'hypothèse d'un transfert positif entre le patron à apprendre et son symétrique. Ce transfert, déjà été observé dans les coordinations bi-manuelles (Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1997), a des intérêts tous particuliers dans le cadre du système postural. En effet, contrairement aux systèmes impliquant des membres homologues, la dynamique du système hanche-cheville est asymétrique : l'avance de l'une ou l'autre articulation provoque des différences de

performance, les coordinations menées par les chevilles étant mieux réalisées que les coordinations menées par les hanches (expérimentation 3). A la différence du système bi-manuel, l'ordre entre les composants semble avoir des conséquences importantes sur la stabilité des patrons de coordination produits. Même si ce comportement est marginal (deux participants de l'expérimentation 2), le fait que des participants aient produit un mode proche du symétrique au patron appris à l'issue de la session de pratique mérite un examen plus spécifique. Pour l'expérimentation 4, les participants apprennent une phase relative hanche-cheville de 90°. Le dispositif expérimental sous forme de figure de Lissajous semble effectivement permettre l'apprentissage de ce mode, qui s'était révélé être, lors d'expérimentations préliminaires aux expérimentations 1 et 2, très difficile à produire sans feedback augmenté en cours de mouvement. Les participants de l'expérimentation 4 apprennent donc une phase relative hanche-cheville de 90° et sont testés avant, pendant, à la fin, et une semaine après la pratique, sur quatre patrons de coordination différents : les patrons posturaux identifiés précédemment comme étant intrinsèques 20° et 180°, et les patrons de 90° (phase relative apprise) et 270° (symétrique de la phase relative apprise). Pour finir, nous ajoutons un électro-goniomètre sur le genou afin d'analyser les mouvements pouvant apparaître au niveau de cette articulation lors de la coordination hanche-cheville. Bien que les participants aient pour instruction de garder les genoux tendus dans toutes nos expérimentations, nous avons souhaité vérifier que cette consigne était respectée.

### 3.2.2. Méthode

#### **3.2.2.1. Participants**

Douze participants, 5 filles et 7 garçons, étudiants à l'Université de Paris Sud 11 participent à l'expérimentation de façon bénévole. Ces participants sont âgés de 21 à 32 ans ( $M = 24.75$ ,  $ET = 3.44$ ), leur taille moyenne est de 170.83 cm ( $ET = 6.67$ ) et leur poids moyen de 65.58 kg ( $ET = 9.95$ ). Aucun de ces participants ne présente de défaut visuel (vision normale ou corrigée) ou de trouble de l'équilibre. Les participants ne sont pas informés des objectifs de l'expérimentation et prennent part pour la première fois à une expérimentation sur les coordinations posturales (aucun participant des expérimentations 1, 2 et 3 ne participe à l'expérimentation 4).

### 3.2.2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est identique à celui de l'expérimentation 3 pour les essais en présence de feedback : le participant, debout, pieds nus écartés à largeur de hanches, et mains jointes dans le dos, voit une figure de Lissajous (0.82 m x 0.82 m) rétroprojetée sur un large écran situé à 1.50 m de distance. Comme pour l'expérimentation 3, cette figure présente la coordination hanche-cheville à produire ainsi que la coordination réellement produite par le participant (voir la Figure 3.1.). Les électro-goniomètres sont placés au niveau des centres articulaires de la hanche gauche et de la cheville gauche, de la même façon que dans les expérimentations 1, 2 et 3. De plus, un troisième électro-goniomètre est placé au niveau de l'articulation du genou gauche, sur la face externe.

Durant l'expérimentation, quatre patrons de phase relative hanche-cheville sont demandés :  $20^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$ . Pour tous ces patrons la fréquence d'oscillation est libre, et l'amplitude des hanches et des chevilles présentée sur le modèle est de  $8^\circ$ . Cette amplitude de  $8^\circ$  pour les hanches et pour les chevilles permet aux participants de réaliser tout mode de coordination postural sans poser de problème de déséquilibre. Pour tous les essais, une zone de tolérance est dessinée autour du modèle à suivre. Lorsque les positions des hanches et des chevilles du participant sont à l'intérieur de cette zone, le modèle à suivre se colorie, indiquant que la coordination produite est proche de celle qui est requise (Figure 3.6.).

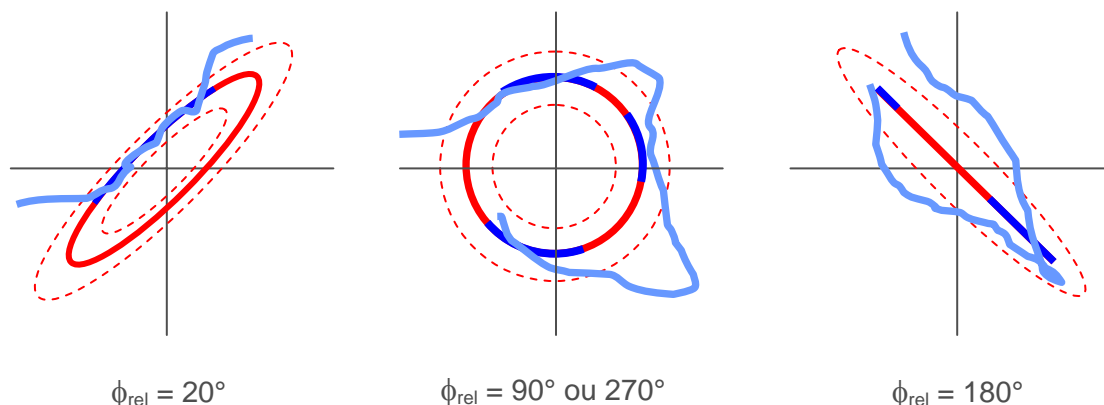


Figure 3.6. Feedback augmenté donné en temps réel au participant : représentation dans l'espace hanche-cheville des quatre phases relatives testées durant l'expérimentation ( $20^\circ$ ,  $90^\circ$  ou  $270^\circ$ , et  $180^\circ$ ) et de leurs zones de tolérance (formes en pointillés rouges). Lorsque les participants produisent une coordination hanche-cheville située dans la zone de tolérance, la forme modèle initialement en rouge se colorie en bleu.

Les patrons de 90° et de 270°, correspondent tous les deux à un cercle dans l'espace hanche-cheville, la différence entre les deux patrons se situant au niveau du sens de rotation : sens des aiguilles d'une montre pour la phase relative de 90° (avance des chevilles sur les hanches), et sens inverse des aiguilles d'une montre pour la phase relative de 270° (avance des hanches sur les chevilles). La zone de tolérance pour 20°, 90° et 270° correspond à une tolérance d'amplitude de  $\pm 35\%$  par rapport à l'amplitude requise par le modèle. Etant donné que le patron de 180° correspond à un segment de droite dans l'espace hanche-cheville, la zone de tolérance est exprimée en terme de phase relative ( $\pm 20^\circ$ ) avec une amplitude supérieure de 35% par rapport à l'amplitude requise par le modèle.

### 3.2.2.3. Tâches et procédure

L'expérimentation se déroule sur 3 jours consécutifs (environ 1 heure pour chaque jour), plus un quatrième jour pour un test de rétention, mené une semaine après la pratique (environ 15 minutes). Les participants réalisent des sessions de test durant lesquelles la performance sur les phases relatives de 20°, 90°, 180° et 270° est évaluée, et des sessions d'apprentissage au cours desquelles le patron de 90° est pratiqué. Durant toutes les étapes de l'expérimentation, les participants ont pour consignes de garder les genoux tendus et la totalité de la surface des pieds en contact avec le sol. Un dispositif électrique situé sous le pied droit du participant signale le soulèvement des orteils ou du talon par l'extinction d'une diode électroluminescente. L'essai est annulé et recommencé si les participants perdent le contact entre le pied et le sol plus de trois fois.

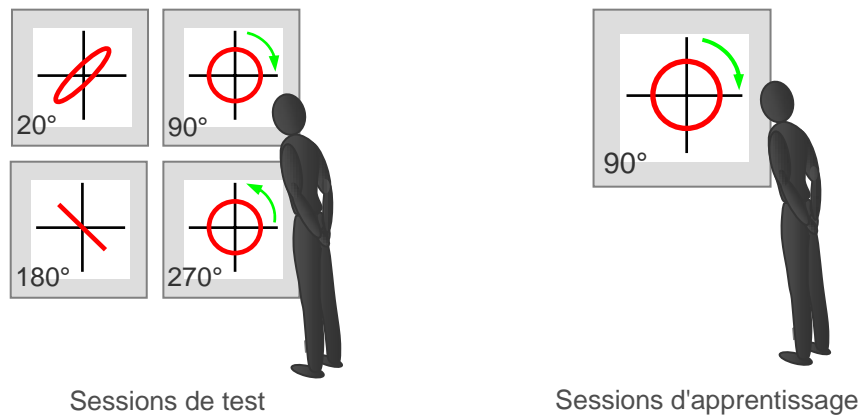
#### *Période de familiarisation.*

Au début du premier jour d'expérimentation, les participants réalisent une période de familiarisation avec le dispositif qui est en tous points identique à celle de l'expérimentation 3 : durée d'environ 15 minutes, durant lesquelles le participant (i) réalise 10 oscillations des hanches et 10 oscillations des chevilles sans variation angulaire de l'autre articulation, puis (ii) trace une forme rectangulaire en passant 3 fois sur chaque côté. Comme pour l'expérimentation 3, les patrons de coordination à suivre sur la figure de Lissajous seront centrés sur le centre d'oscillation de chaque articulation.

#### *Session expérimentale.*

La session expérimentale proprement dite se déroule sur trois jours. Elle est constituée de quatre sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et test de rétention), et de trois

sessions d'apprentissage (Figure 3.7.). Pour tous les essais (test et pratique), les participants ont pour consigne de privilégier la forme du patron à suivre plutôt que sa taille ou sa position dans le repère hanche-cheville. Le but de cette consigne est que les participants respectent en priorité la relation de phase demandée plutôt que l'amplitude articulaire ou le centre d'oscillation des hanches et des chevilles. Durant les sessions de test, les participants doivent produire des phases relatives de 20°, 90°, 180° et 270°, à raison de 3 essais de 10 cycles par patron de coordination. Les différents patrons sont présentés de façon randomisée afin de minimiser les effets d'ordre de passation. Durant les sessions de pratique, les participants effectuent le mode de 90° pour un total de 50 essais de 10 cycles.



Session	Fam	Pré-T	App	App	Test I	App	Post-T	Rét
Nbr d'essais		4 × 3	10	20	4 × 3	20	4 × 3	4 × 3
Jour		1		2		3		4

Figure 3.7. Protocole de l'expérimentation 4. Partie supérieure : Tâches lors des sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et rétention) et d'apprentissage. Lors des sessions de test, les participants doivent réaliser 3 essais de 10 cycles sur 4 phases relatives différentes (20°, 90°, 180° et 270°). Les sessions d'apprentissage, réparties sur les jours 1, 2 et 3, contiennent en tout 50 essais de pratique de la phase relative de 90°. Partie inférieure : Organisation des sessions expérimentales (Fam : période de familiarisation ; Pré-T : pré-test ; App : sessions d'apprentissage ; Test I : test intermédiaire ; Post-T : post-test ; Rét : test de rétention), et nombre d'essai par session sur les quatre jours. Les jours 1, 2 et 3 sont consécutifs. Le test de rétention est mené une semaine après la pratique.

Après la période de familiarisation le premier jour, les participants réalisent le pré-test et la première session d'apprentissage, comprenant 10 essais sur la tâche de 90°. Le deuxième jour débute par la deuxième session d'apprentissage (20 essais) et se termine par un test intermédiaire de 20°, 90°, 180° et 270°. Le troisième jour est identique au deuxième, avec 20 essais de pratique de 90° et le test final (post-test). Une semaine après la pratique, un test de rétention est mené afin d'évaluer la performance sur les patrons de 0°, 90°, 180° et 270° après une interruption de la pratique.

#### 3.2.2.4. Variables dépendantes

De même que pour les expérimentations 1, 2 et 3, les données des électro-goniomètres sont filtrées grâce à un filtre passe-bas (fréquence de coupure de 2 Hz), et le premier cycle de chaque essai est exclu des analyses. Quatre variables dépendantes sont ensuite calculées pour caractériser la coordination produite : (i) la phase relative,  $\phi_{rel}$ , entre les hanches et les chevilles, (ii) l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , (iii) l'erreur absolue,  $EA$ , et (iv) le temps de mouvement,  $TM$ , qui correspond au temps mis pour réaliser les 10 cycles de chaque essai. De plus pour le pré-test et le post-test, nous mesurons l'amplitude angulaire par cycle des articulations des hanches, des chevilles, et des genoux. La phase relative hanche-cheville et son écart-type sont calculés de la même façon que dans les expérimentations 1, 2 et 3. L'erreur absolue ( $EA$ ), indicatrice de l'importance de l'erreur, est calculée pour chaque cycle de mouvement de la même façon que pour l'expérimentation 3. Elle correspond à la valeur absolue de la différence entre la phase relative produite et la phase relative requise.

Nous utilisons des statistiques circulaires pour calculer les valeurs moyennes, l'écart-type et l'intervalle de confiance à 95% (Batschelet, 1981 ; Mardia, 1972) de nos variables circulaires ( $\phi_{rel}$ ,  $ET\phi_{rel}$ , et  $EA$ ). Des tests de Watson-Williams sont réalisés pour la phase relative (variable ayant une étendue de 360°) et dès lors que leurs analyses suffisent. Lorsque nous devons tester des effets d'interaction entre facteurs, nous effectuons des ANOVAs sur  $ET\phi_{rel}$  et  $EA$  (et, logiquement sur la variable linéaire  $TM$ ).

### 3.2.3. Résultats

Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer les conséquences de l'apprentissage du patron de coordination de 90° sur les modes intrinsèques requis par information comportementale et sur le mode symétrique au patron appris. Dans un premier temps, nous présentons les résultats relatifs aux amplitudes angulaires des articulations afin d'évaluer l'implication des genoux dans la coordination hanche-cheville. Nous analysons ensuite l'évolution du patron de coordination produit au cours de la pratique de 90°, et pour finir, nous évaluerons les conséquences de cet apprentissage pour les patrons requis lors des sessions de test (20°, 90°, 180°, 270°). Des analyses individuelles ont été réalisées mais ne sont pas présentées ici. En effet, elles n'ont pas révélé de comportements différenciés entre les individus, la majorité des participants se comportant à l'image des moyennes par groupe. Un participant sur les 12 ne participe pas au test de rétention mené une semaine après la pratique. Pour ce test, le nombre de participant est donc réduit à 11.

#### **3.2.3.1. Amplitude des articulations**

La Figure 3.8. présente les amplitudes des hanches, des chevilles et des genoux pour le pré-test et le post-test. Une ANOVA Articulation (hanches, chevilles, genoux) × Test (pré-test, post-test) × Patron (20°, 90°, 180°, 270°) avec mesures répétées est menée sur ces amplitudes articulaires. Elle révèle un effet significatif du facteur Articulation ( $F(2, 22) = 5.58, p < .05$ ), du facteur Patron ( $F(3, 33) = 17.44, p < .05$ ), mais pas du facteur Test ( $F(1, 11) = 1.99, ns$ ). Les interactions Articulation × Test ( $F(2, 22) = 5.03, p < .05$ ) et Articulation × Patron ( $F(6, 66) = 3.25, p < .05$ ) sont significatives, ce qui n'est pas le cas des interactions Test × Patron ( $F(3, 33) < 1, ns$ ) et Articulation × Test × Patron ( $F(6, 66) = 1.83, ns$ ). Des comparaisons planifiées réalisées pour chaque articulation révèlent que l'effet du facteur Patron est significatif pour les hanches et les chevilles ( $F_s(3, 33) > 8.12, p < .05$ ), mais pas pour les genoux ( $F(3, 33) = 1.46, ns$ ). Autrement dit, l'amplitude angulaire des genoux ne dépend pas du patron de coordination requis. D'autre part, une comparaison post-hoc de Newman-Keuls montre que les amplitudes de chaque articulation sont significativement différentes les une des autres, avec par ordre d'importance d'amplitude, les hanches (amplitude moyenne de 8.72°), les chevilles (amplitude moyenne de 7.37°), et les genoux (amplitude moyenne de 4.88°). Sur l'ensemble de ces analyses, les résultats qui nous intéressent en priorité sont ceux des genoux. Nous pouvons constater que malgré la consigne, il existe des mouvements au niveau de cette articulation. Néanmoins, ces mouvements sont relativement



peu importants et significativement plus faibles que ceux des hanches et des chevilles. D'autre part, l'absence d'effet du facteur Patron pour les genoux, montre que leur amplitude ne dépend pas du patron requis, ce qui indique un rôle semblable de cette articulation pour l'ensemble des patrons testés.

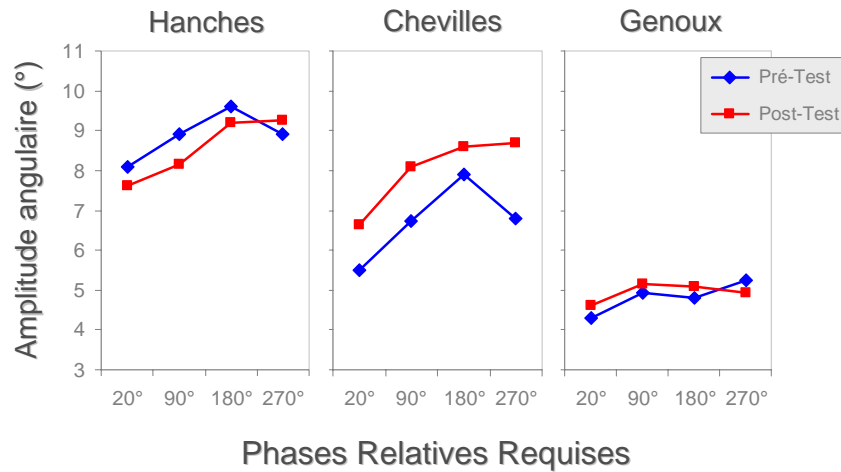


Figure 3.8. Amplitude des hanches, des chevilles et des genoux (de gauche à droite), en fonction de la phase relative requise (axe des abscisses) et de la session de test (courbes bleues pour le pré-test, et courbes rouges pour le post-test).

### 3.2.3.2. Session d'apprentissage

La Figure 3.9. représente l'évolution des paramètres indicateurs de performance  $\phi_{rel}$ ,  $EA$ ,  $ET\phi_{rel}$  et  $TM$  au cours de la pratique de  $90^\circ$  (essais regroupés par blocs de 5). Nous analysons l'évolution de chacun de ces paramètres ci-dessous. Les valeurs moyennes obtenues lors du test de rétention (3 essais) sont représentées graphiquement mais seront analysées statistiquement dans la partie sur les sessions de test.

#### *Evolution de la précision.*

La Figure 3.9.A présente l'évolution de la phase relative moyenne ainsi que son intervalle de confiance à 95% (surface bleue) avec les blocs de pratique. Des tests de Watson-Williams révèlent une diminution significative de la phase relative produite entre le premier bloc de pratique et tous les blocs à partir du bloc 5,  $F_s > 4.03$ ,  $p < .05$ . Au-delà de cette diminution générale, nous pouvons constater que le patron produit reste relativement éloigné du patron requis de  $90^\circ$  (ligne en pointillés). L'intervalle de confiance à 95% autour de  $\phi_{rel}$  ne contient jamais le patron requis de  $90^\circ$ , même après 500 cycles de pratique où les participants

ont un retour précis et en temps réel sur l'écart entre ce qu'ils produisent et ce qui est demandé. La Figure 3.9.B montre une diminution progressive de l'erreur absolue au cours de la pratique, qui passe d'une valeur moyenne de  $41.47^\circ$  lors des 5 premiers essais de pratique (bloc 1) à  $23.94^\circ$  lors de 5 derniers essais (bloc 10). Cette amélioration du patron produit est démontrée statistiquement par une ANOVA avec mesures répétées, qui montre un effet significatif du bloc de pratique (blocs 1 à 10) sur  $EA$ ,  $F(9, 99) = 5.61$ ,  $p < .05$ . Ces résultats montrent un progrès au niveau de la précision du patron produit, mais avec une erreur qui reste relativement élevée dans le sens d'une surestimation du patron requis de  $90^\circ$ . Ainsi, pour le dernier bloc de pratique, la phase relative produite moyenne est de  $108.10^\circ$ , ce qui correspond à une erreur constante moyenne de  $+18.10^\circ$ .

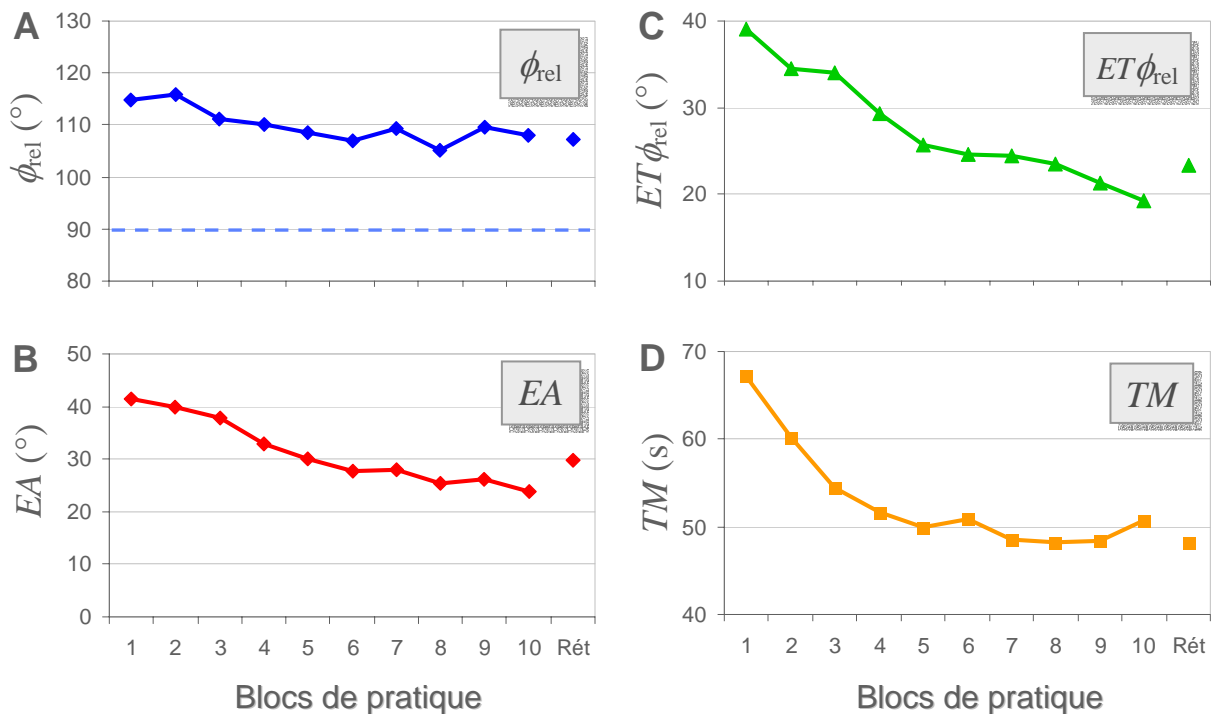


Figure 3.9. Evolution (A) de la phase relative produite,  $\phi_{rel}$  et de son intervalle de confiance à 95% (la phase relative requise est indiquée par la ligne en pointillés), (B) de l'erreur absolue,  $EA$ , (C) de l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , et (D) du temps de mouvement,  $TM$ , avec les blocs de pratique de  $90^\circ$ . Chaque bloc de pratique contient 5 essais, et le test de rétention (Rét) en contient 3.

#### Evolution de la stabilité.

La Figure 3.9.C présente l'évolution de l'écart-type de la phase relative au cours des blocs de pratique. La stabilité du patron produit s'améliore de façon continue avec la pratique,

passant d'une valeur moyenne de  $39.01^\circ$  pour le bloc 1 à  $19.31^\circ$  pour le bloc 10. Des tests de Watson-Williams montrent une diminution significative de  $ET\phi_{rel}$  entre le premier bloc de pratique et tous les blocs à partir du bloc 4,  $F_s > 13.85$ ,  $p < .05$ . Ces analyses circulaires par paires sont confirmées par une ANOVA avec mesures répétées qui révèle un effet significatif du bloc de pratique (blocs 1 à 10),  $F(9, 99) = 15.61$ ,  $p < .05$ .

*Evolution du temps de mouvement.*

La Figure 3.9.D montre la diminution du temps de mouvement avec la pratique de  $90^\circ$ .  $TM$  passe d'une valeur moyenne de 67.22 s (soit 0.15 Hz) au début de la pratique (bloc 1) à 50.65 s (soit 0.20 Hz) à la fin de la pratique (bloc 10). Cette diminution est démontrée statistiquement par une ANOVA avec mesures répétées qui indique un effet significatif du bloc de pratique (blocs 1 à 10) sur le temps de mouvement,  $F(9, 99) = 5.41$ ,  $p < .05$ .

**3.2.3.3. Sessions de test**

Nous présentons ici les résultats obtenus par le groupe de participants lors des sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et test de rétention) sur les quatre patrons requis : les patrons intrinsèques de  $20^\circ$  et  $180^\circ$ , le patron pratiqué de  $90^\circ$ , et son symétrique non pratiqué de  $270^\circ$ . Les Figures 3.10.A, et 3.10.B représentent les distributions de fréquence de phase relative grâce à des diagrammes circulaires pour les quatre patrons requis et les quatre sessions de test. La fréquence d'apparition des différents patrons de phase relative (calculée par intervalle de  $10^\circ$ ) est représentée de façon radiale en pourcentage du nombre de cycle total. Les cercles concentriques graduent la fréquence relative tous les 5%. Tous les diagrammes circulaires comportent des échelles allant de 0% (origine) à 20% (cercle le plus grand), sauf pour le test de rétention du patron de  $180^\circ$  (présence de 5 cercles concentriques, soit 25% de fréquence relative pour le plus grand cercle). Une première observation de ces diagrammes montre une augmentation du caractère directionnel des phases relatives produites (augmentation de la fréquence relative maximale observée) entre le pré-test et le post-test, pour tous les patrons requis. D'autre part, la surestimation du patron de  $90^\circ$  repérée lors de l'analyse de la session d'apprentissage se confirme lors des sessions de test : les phases relatives sont majoritairement produites pour des valeurs supérieures à  $90^\circ$ . Nous analysons maintenant ces distributions de façon plus précise à partir des variables qui nous permettent de caractériser la précision et la stabilité du patron produit :  $\phi_{rel}$ ,  $EA$ ,  $ET\phi_{rel}$  et  $TM$ .

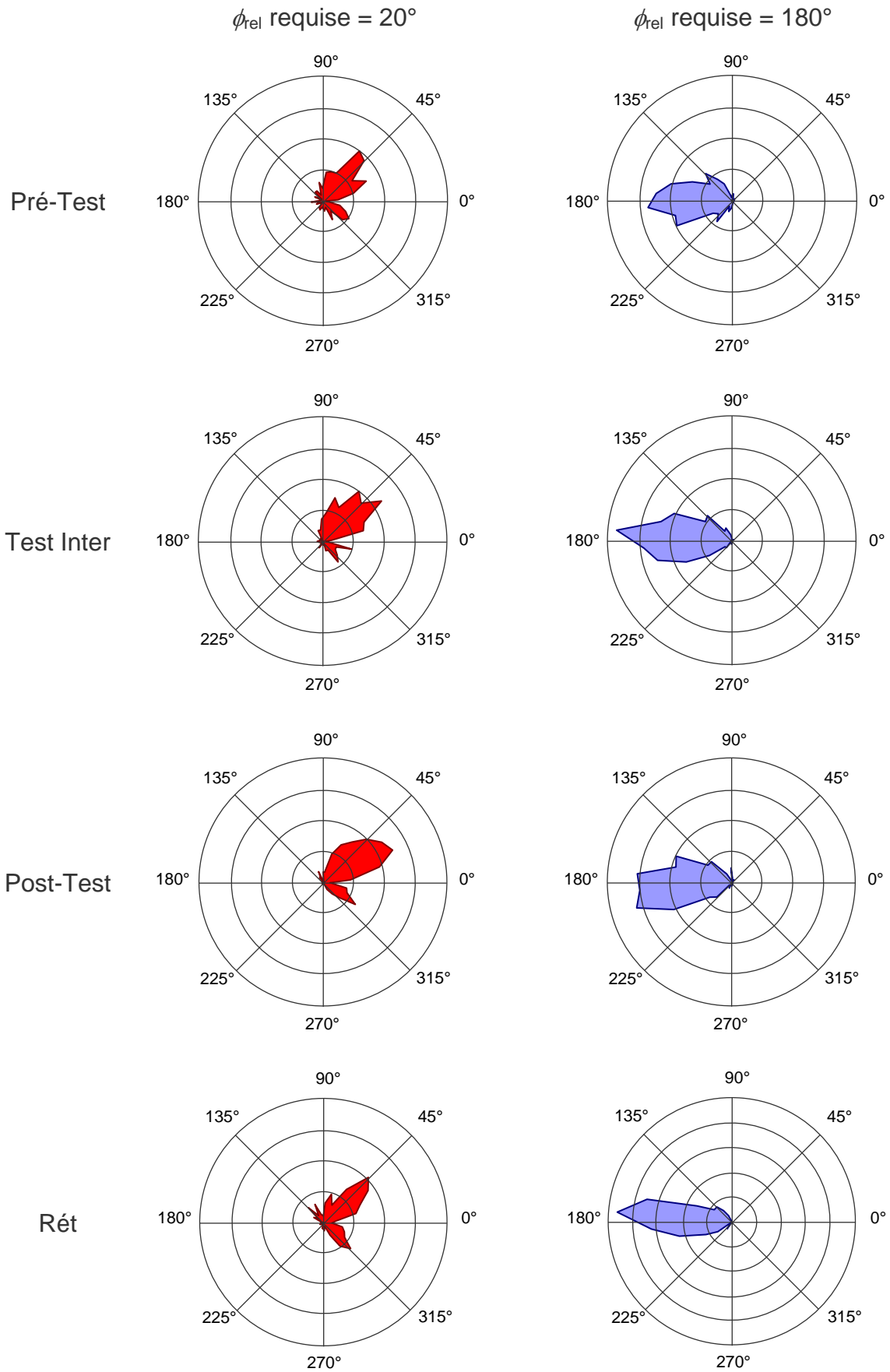


Figure 3.10.A. Diagrammes de fréquence relative pour les patrons requis de 20° et 180°.

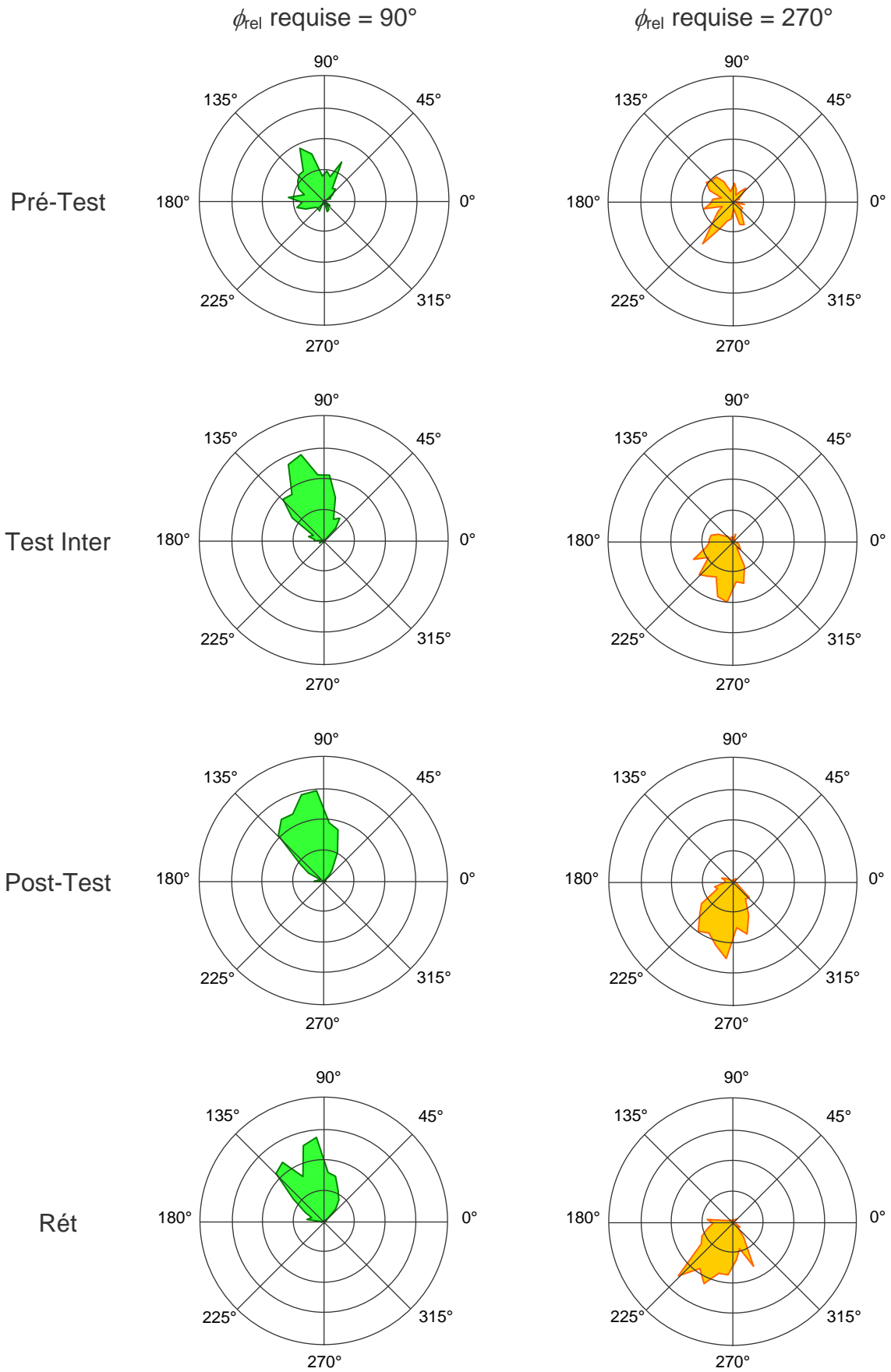


Figure 3.10.B. Diagrammes de fréquence relative pour les patrons requis de  $90^\circ$  et  $270^\circ$ .

*Phase relative produite.*

La Figure 3.11. présente la phase relative moyenne des quatre patrons requis avant (pré-test), au cours de (test intermédiaire), à la fin (post-test) et une semaine après (test de rétention) l'apprentissage de 90°. Nous pouvons constater un état stationnaire des phases relatives moyennes produites pour les différentes sessions de test lorsque les patrons intrinsèques de 20° et 180° sont requis. Les valeurs moyennes de phase relative sont précisément fixées sur 180° pour le patron en anti-phase, et ce pour toutes les sessions de test. Le patron en phase est légèrement surestimé par rapport à la phase relative de 20° requise, et présente des valeurs moyennes de  $\phi_{rel}$  allant de 30.27° au pré-test à 25.10° au post-test. Néanmoins, ces valeurs sont proches de celles observées par Bardy et ses collaborateurs pour le patron spontané en phase (e.g.,  $\phi_{rel} \approx 29^\circ$  pour Bardy et al., 2002) ou pour le groupe basse fréquence de notre expérimentation 2 ( $\phi_{rel} = 30.62^\circ$ ).

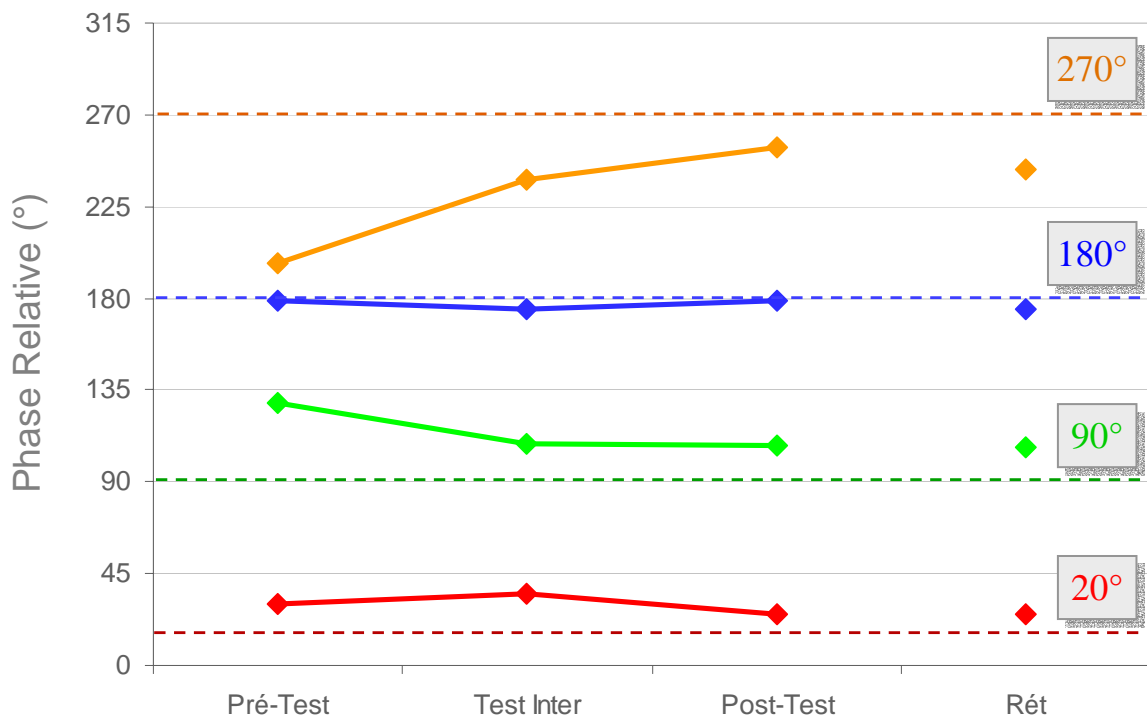


Figure 3.11. Evolution de la phase relative moyenne produite sur les 4 sessions de test (Pré-test, Test intermédiaire, Post-test, et test de rétention) pour les 4 phases relatives requises : 20° (courbe rouge), 90° (courbe verte), 180° (courbe bleue), et 270° (courbe orange). Les lignes en pointillés indiquent la phase relative requise dans la couleur correspondant au patron produit.

Des tests de Watson-Williams pour échantillons multiples sont utilisés pour tester si la phase relative produite diffère lors des quatre sessions de test. Lorsque les patrons intrinsèques sont requis, les analyses ne révèlent pas de variation significative de  $\phi_{\text{rel}}$  entre les tests ( $F(3, 1247) = 2.08$ , *ns*, pour le patron de  $20^\circ$  et  $F(3, 1258) = 2.12$ , *ns*, pour le patron de  $180^\circ$ ). Par contre, pour les patrons de  $90^\circ$  et  $270^\circ$ , la différence entre les sessions tests est significative ( $F(3, 1257) = 14.13$ ,  $p < .05$ , pour le patron de  $90^\circ$  et  $F(3, 1246) = 33.68$ ,  $p < .05$ , pour le patron de  $270^\circ$ ). La Figure 3.11. montre en effet qu'après des valeurs de phase relative produites relativement éloignées de celles requises au pré-test ( $\phi_{\text{rel}} = 128.32^\circ$  et  $\phi_{\text{rel}} = 196.82^\circ$  lorsque  $90^\circ$  et  $270^\circ$  sont demandés, respectivement), les participants s'approchent des patrons requis, atteignant ainsi des phases relatives moyennes de  $107.39^\circ$  lorsque  $90^\circ$  est requis et de  $253.92^\circ$  lorsque  $270^\circ$  est requis.

#### *Erreur absolue.*

L'erreur absolue permet d'évaluer la précision avec laquelle les patrons de coordination sont produits. La Figure 3.12. présente les valeurs moyennes d'erreur absolue pour les quatre patrons lors des différentes sessions de test. De façon inattendue, nous pouvons constater que tous les patrons de coordination ont tendance à être plus précis au cours des sessions de pratique. Une ANOVA Patron ( $20^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ )  $\times$  Test (pré-test, test intermédiaire, post-test) avec mesures répétées révèle un effet significatif du facteur Patron ( $F(3, 33) = 20.52$ ,  $p < .05$ ), du facteur Test ( $F(2, 22) = 96.02$ ,  $p < .05$ ), ainsi que de l'interaction Patron  $\times$  Test ( $F(6, 66) = 8.52$ ,  $p < .05$ ). L'effet d'interaction montre que l'apprentissage n'influence pas la précision des différents patrons de coordination avec la même importance. Des comparaisons planifiées permettent d'analyser les interactions Patron  $\times$  Test de façon plus spécifique par paire de patrons requis. Ces analyses révèlent que la comparaison de  $90^\circ$  et  $270^\circ$  donne la seule interaction Test  $\times$  Patron à ne pas être significative ( $F(2, 22) = 1.84$ , *ns*). Autrement dit, le patron appris ( $90^\circ$ ) et son symétrique ( $270^\circ$ ) présentent un progrès de précision comparable au cours des tests. L'erreur absolue des différents patrons pour chaque session de test est comparée grâce à des analyses post-hoc de Newman-Keuls. Ces analyses révèlent que le patron de  $180^\circ$  est significativement plus précis que les trois autres lors du pré-test ( $p < .05$ ).  $20^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $270^\circ$  ne diffèrent pas entre eux avant la pratique. Lors du post-test,  $180^\circ$  est significativement plus précis que  $90^\circ$ , qui est lui-même plus précis que  $20^\circ$  et  $270^\circ$ . La précision de  $20^\circ$  et de  $270^\circ$  ne diffère pas lors du post-test.

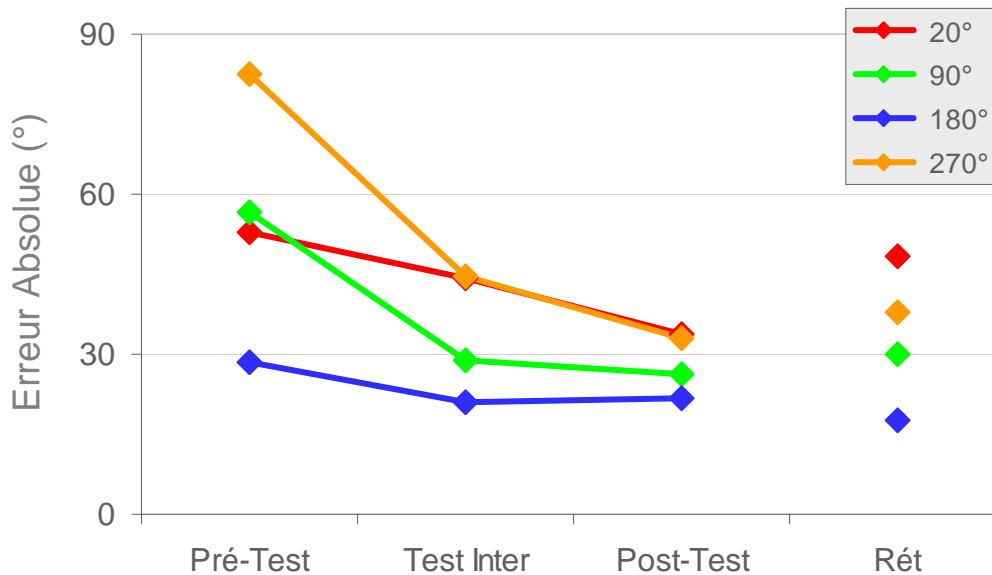


Figure 3.12. Evolution de l'erreur absolue au cours des sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et rétention) pour les quatre patrons requis (20°, 90°, 180° et 270°).

Concernant le test de rétention (pour lequel nous avons 11 et non plus 12 participants), une ANOVA Patron (20°, 90°, 180°, 270°) × Test (post-test, rétention) révèle un effet significatif du facteur Patron ( $F(3, 30) = 10.47, p < .05$ ), du facteur Test ( $F(1, 10) = 5.18, p = .05$ ), ainsi que de l'interaction Patron × Test ( $F(3, 30) = 6.67, p < .05$ ). La Figure 3.12. montre en effet que les différences de précision entre les patrons ont tendance à s'accroître entre la fin de la pratique (post-test) et le test de rétention. Des analyses post-hoc de Newman-Keuls montrent que la différence entre le post-test et le test de rétention n'est significative que pour le patron de 20°, dans le sens d'une augmentation de l'erreur absolue ( $p < .05$ ). Concernant la hiérarchie de la précision des différents patrons lors du test de rétention, EA est significativement plus basse lorsque le patron de 180° est requis. Pour les autres patrons, 20° est significativement moins précis que les trois autres patrons et 90° et 270° ne diffèrent pas significativement.

#### *Ecart-type de la phase relative.*

La Figure 3.13. présente l'évolution de la stabilité ( $ET\phi_{rel}$ ) pour les quatre patrons requis lors des différentes sessions de test. Les observations faites sur la précision du patron produit sont presque équivalentes pour la stabilité. Tous les patrons présentent une diminution de  $ET\phi_{rel}$  entre le pré-test et le post-test, mais pas dans les mêmes proportions. Comme pour



EA, une ANOVA Patron ( $20^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ )  $\times$  Test (pré-test, test intermédiaire, post-test) avec mesures répétées, menée sur  $ET\phi_{rel}$ , révèle un effet significatif du facteur Patron ( $F(3, 33) = 22.27, p < .05$ ), du facteur Test ( $F(2, 22) = 62.62, p < .05$ ), ainsi que de l'interaction Patron  $\times$  Test ( $F(6, 66) = 5.93, p < .05$ ). Les comparaisons planifiées menées par paire de patron requis sur les interactions Patron  $\times$  Test montrent que ces interactions sont significatives entre tous les patrons ( $F_s(2, 22) > 4.95, p < .05$ ), sauf entre  $90^\circ$  et  $270^\circ$  d'une part ( $F(2, 22) = 1.21, ns$ ), et entre  $20^\circ$  et  $180^\circ$  d'autre part ( $F(2, 22) = 1.58, ns$ ). Ainsi, le patron appris ( $90^\circ$ ) et son symétrique ( $270^\circ$ ) présentent une évolution de la stabilité au cours des tests qui ne diffère pas de façon significative, de même que les patrons intrinsèques de  $20^\circ$  et  $180^\circ$ . D'autre part, les patrons intrinsèques présentent une progression de stabilité moindre que le patron appris et son symétrique. Des analyses post-hoc de Newman-Keuls montrent qu'au pré-test,  $180^\circ$  est significativement plus stable que les autres patrons. Lors du post-test, les patrons sont tous significativement différents les uns des autres, avec dans l'ordre de stabilité :  $180^\circ, 90^\circ, 270^\circ$  et  $20^\circ$ .

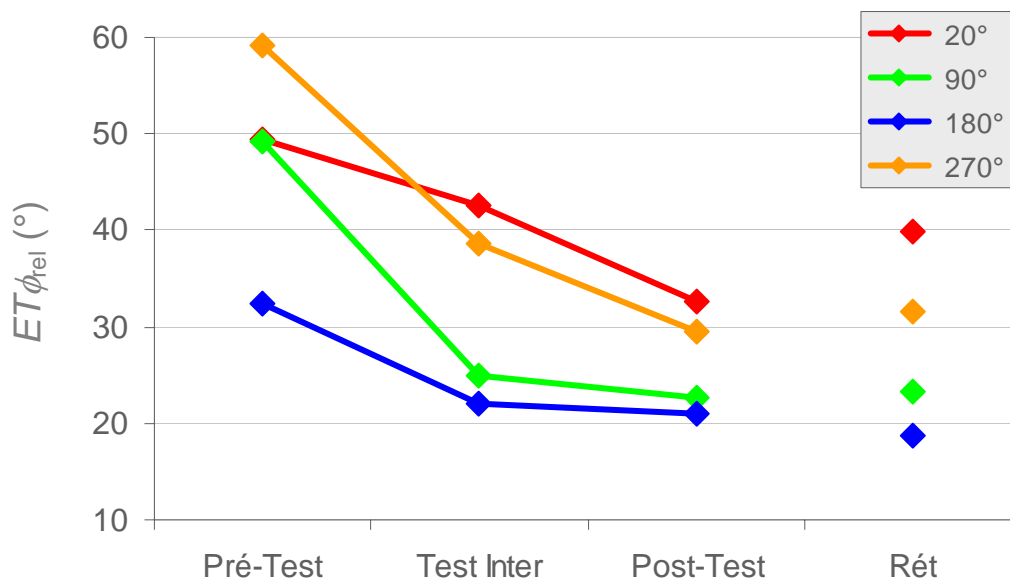


Figure 3.13. Evolution de l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , au cours des sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et rétention) pour les quatre patrons requis ( $20^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  et  $270^\circ$ ).

La persistance de la stabilité atteinte au post-test lors du test de rétention est analysée grâce à une ANOVA Patron ( $20^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ )  $\times$  Test (post-test, rétention). L'effet du facteur Patron est significatif ( $F(3, 30) = 15.67, p < .05$ ), ce qui n'est pas le cas du facteur Test

( $F(1, 10) = 1.36, ns$ ) et de l'interaction Patron  $\times$  Test ( $F(3, 30) = 2.36, ns$ ). Des analyses post-hoc de Newman-Keuls montrent que la stabilité du patron ne diffère pas entre le pré-test et le post-test pour les patrons de 90°, 180° et 270°. Par contre, le patron de 20° présente une diminution significative de la stabilité une semaine après la pratique ( $p < .05$ ). Lors du test de rétention, la stabilité des patrons de 180° et 90° ne diffère pas, et est significativement plus importante que pour 270° et 20°. 20° est significativement le patron le plus instable lors du test de rétention.

*Temps de mouvement.*

Comme la précision et la stabilité du patron produit, le temps de mouvement présente une amélioration générale entre le pré-test et le post-test (Figure 3.14.). Une ANOVA Patron (20°, 90°, 180°, 270°)  $\times$  Test (pré-test, test intermédiaire, post-test) avec mesures répétées montre un effet significatif du facteur Patron ( $F(3, 33) = 9.55, p < .05$ ) et du facteur Test ( $F(2, 22) = 7.89, p < .05$ ), mais pas d'effet d'interaction ( $F(6, 66) = 1.59, ns$ ). Les patrons présentent donc, de façon générale, des temps de mouvement différents, qui présentent un taux de progrès comparable au cours des tests. Des analyses post-hoc de Newman-Keuls montrent que sur l'ensemble des tests, le patron de 270° est le plus long à être produit ( $p < .05$ ). D'autre part, *TM* est plus bas pour 180° que pour 90° ( $p < .05$ ) mais ne diffère pas significativement de 20°. La différence de temps de mouvement entre 20° et 90° n'est pas significative.



Figure 3.14. Evolution du temps de mouvement au cours des sessions de test (pré-test, test intermédiaire, post-test et rétention) pour les quatre patrons requis (20°, 90°, 180° et 270°).

### 3.2.4. Discussion

L'expérimentation 4 investiguait les conséquences de l'apprentissage d'une coordination hanche-cheville de  $90^\circ$  sur des patrons requis par information comportementale : les patrons identifiés comme spontanés dans de précédentes expérimentations ( $\phi_{rel} = 20^\circ$  et  $\phi_{rel} = 180^\circ$ ) et le patron de coordination symétrique au patron appris ( $\phi_{rel} = 270^\circ$ ). Trois résultats principaux sont observés : (i) la performance du mode de  $90^\circ$  s'améliore au cours des trois jours de pratique, mais ce patron reste tout de même surestimé à l'issue de la session d'apprentissage ; (ii) à l'inverse de ce qui pouvait être attendu, la performance des patrons de coordination de  $20^\circ$  et  $180^\circ$  s'améliore avec la pratique de  $90^\circ$  ; (iii) le patron de  $270^\circ$  (symétrique au patron appris) présente également une amélioration avec la pratique de  $90^\circ$ , qui ne diffère pas significativement de celle du patron de  $90^\circ$  lui-même et qui est significativement plus importante que celle des patrons intrinsèques. Ces résultats sont considérés ici de façon préliminaire et seront discutés de façon plus approfondie à l'issue de l'expérimentation 5, qui ouvre un point de vue plus large sur leur compréhension.

#### *Session d'apprentissage.*

Concernant la session d'apprentissage, les résultats montrent, comme pour les expérimentations 1 et 2, un progrès significatif de la précision, de la stabilité et de la vitesse d'exécution du patron de coordination à apprendre. Néanmoins, en dépit de la présence du feedback augmenté en cours de mouvement durant 500 cycles de pratique, la phase relative de  $90^\circ$  n'est pas tout à fait atteinte, et reste surestimée à la fin de la session d'apprentissage. Nous avons déjà mis en évidence lors d'expérimentations préliminaires aux expérimentations 1 et 2, qu'une phase relative de  $90^\circ$  entre les hanches et les chevilles était particulièrement difficile à produire. Les résultats de l'expérimentation 4 révèlent que le dispositif expérimental sous forme de figure de Lissajous ne permet pas de surmonter totalement cette difficulté. Comme nous l'avons souligné précédemment (voir la Figure 2.1.), la réalisation du patron de  $90^\circ$  implique de longer les limites de stabilité de l'équilibre érigé. Il est probable que les participants aient tendance à produire une phase relative plus haute que celle qui est demandée pour résoudre cette insécurité. En effet, plus la valeur de phase relative augmente, plus le patron de coordination s'éloigne des limites de l'équilibre (i.e., augmentation de l'excentricité de l'ellipse).

*Conséquences de l'apprentissage.*

Comme nous l'avions observé dans l'expérimentation 3, le patron en phase n'est pas apparu de façon stable lors du pré-test. Ainsi, ce patron apparaît spontanément lors de la réalisation de la tâche supra-posturale de façon aussi stable que l'anti-phase (e.g., pour l'expérimentation 2,  $ET\phi_{rel} = 41.10^\circ$  pour le patron en phase,  $ET\phi_{rel} = 40.83^\circ$  pour le patron en anti-phase), mais n'est pas aussi facilement reproductible lorsqu'une exigence comportementale l'impose. Non seulement le patron de  $20^\circ$  est produit de façon moins précise et stable que celui de  $180^\circ$ , mais il n'est pas significativement différent des patrons de  $90^\circ$  et  $270^\circ$  qui ne sont jamais apparus de façon spontanée lors de la tâche de poursuite de cible.

Nous avons supposé que la pratique du patron de  $90^\circ$  entraînerait d'une part, une amélioration de la performance pour ce patron, ainsi que pour son symétrique de  $270^\circ$ , et d'autre part, un effet négatif sur la performance des patrons de  $20^\circ$  et  $180^\circ$ . De façon inattendue, nous avons constaté que la performance des quatre patrons testés ( $20^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$ ) s'améliorait au cours de la pratique de  $90^\circ$ . Néanmoins, les évolutions pour ces patrons requis sont différentes. Pour les patrons de  $20^\circ$  et  $180^\circ$ , identifiés comme spontanés lors de la tâche supra-posturale (e.g., Bardy et al., 1999, 2002), les phases relatives moyennes produites sont proches des valeurs requises dès le pré-test et restent stationnaires lors des tests ultérieurs. Pour le patron appris de  $90^\circ$  et son symétrique non pratiqué de  $270^\circ$ , la phase relative moyenne produite au pré-test est relativement éloignée du patron requis, puis s'en rapproche ensuite avec l'augmentation de la quantité de pratique de  $90^\circ$ . Les patrons intrinsèques ( $20^\circ$  et  $180^\circ$ ) présentent des progrès moindres par rapport aux patrons non-spontanés ( $90^\circ$  et  $270^\circ$ ) qui semblent suivre une amélioration comparable de la précision et de la stabilité grâce à l'apprentissage de  $90^\circ$ . La hiérarchie de performance des quatre patrons testés se retrouve ainsi bousculée en conséquence de la pratique de  $90^\circ$ . Lors du pré-test, les patrons de  $20^\circ$ ,  $90^\circ$  et  $270^\circ$  ne diffèrent pas significativement du point de vue de la précision et de la stabilité. Par contre, lors du post-test,  $90^\circ$  devient plus précis et plus stable que  $20^\circ$  et  $270^\circ$ . Lors du test de rétention,  $270^\circ$  atteint une précision comparable à celle de  $90^\circ$ , et  $90^\circ$  une stabilité comparable à celle de  $180^\circ$ . Une semaine après la pratique de  $90^\circ$ , le patron de  $20^\circ$  est significativement moins précis et moins stable que  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$ . Lors des différentes sessions de test,  $180^\circ$  reste le patron le plus précis et le plus stable de tous. Ce résultat majeur est tout à fait contraire à nos attentes. En effet, si les effets néfastes de l'apprentissage pouvaient sembler improbables pour le patron de  $20^\circ$  (étant donné qu'il n'apparaissait pas de façon stable lorsqu'il était requis), ils étaient plus que vraisemblables

pour le patron de 180°. Or, non seulement ce patron s'améliore, mais il reste le plus performant malgré la pratique de 90°.

*Conclusion.*

Ces résultats soulèvent de nombreuses questions sur la correspondance qui existe entre les conséquences de l'apprentissage sur les coordinations spontanées vs. requises. Est-ce que les participants de l'expérimentation 4 auraient présenté une modification du patron de coordination spontanée s'ils avaient été testés sur la tâche de poursuite de cible ? Étant donné les importantes différences interindividuelles constatées dans les expérimentations 1 et 2, il semble prépondérant d'analyser les conséquences de l'apprentissage sur les coordinations spontanées et requises pour un même participant. En effet, nous ne pouvons exclure l'hypothèse que les participants de l'expérimentation 4 n'auraient pas présenté de modification de la coordination spontanée à la suite de l'apprentissage de 90°. L'évolution constatée pour la performance des quatre patrons testés (20°, 90°, 180° et 270°) signifie-t-elle que n'importe quel patron requis aurait présenté un progrès significatif avec l'apprentissage de 90° ? Ces questions sont investiguées dans l'expérimentation 5, grâce à l'utilisation conjointe de la tâche supra-posturale de poursuite de cible et d'un test de balayage requérant douze patrons de coordination hanche-cheville sur l'ensemble du diagramme de phase.

### **3.3. Expérimentation 5**

#### 3.3.1. Introduction

"Le fait que le patron de mouvement soit le but de la tâche place cette tâche dans une catégorie spéciale qui est parfois définie par le terme 'habileté fermée' (e.g., Gentile, 1972). Les habiletés fermées, contrairement aux habiletés ouvertes, n'ont pas de solutions différentes disponibles pour résoudre la tâche motrice. Le fait que les résultats obtenus à partir de ce type de tâche soient également applicables aux habiletés qui ne sont pas contraintes par des mouvements spécifiques n'est pas clair." Ce problème formulé par Hodges et Franks (2002, p. 256), s'applique assez bien aux résultats divergents que nous avons obtenus dans nos premières expérimentations. Les expérimentations 1 et 2 ont révélé un changement de patron spontanée en conséquence de l'apprentissage d'une phase relative hanche-cheville de 135°. Après cet apprentissage, les patrons intrinsèques identifiés initialement (en phase et en anti-phase) sont moins stables, ou n'apparaissent plus lors de la réalisation de la tâche supra-posturale. D'un autre côté, les résultats de l'expérimentation 4 montrent que lorsque ces

patrons intrinsèques constituent le but de la tâche, ils présentent une amélioration imprévue avec la pratique d'une phase relative de 90°. De plus, le patron de 180° reste incontestablement le patron le mieux réalisé quelque soit la quantité de pratique effectuée sur la tâche de 90°. La discordance de ces résultats expérimentaux nous pousse à évaluer plus précisément la relation qui existe entre l'influence de l'apprentissage sur les patrons spontanés vs. requis par information comportementale. L'apprentissage d'un nouveau mode de coordination a-t-il des conséquences différentes selon la nature de la tâche considérée (phase relative requise ou but supra-postural) ? Il est possible que les patrons posturaux intrinsèques en phase et en anti-phase soient toujours réalisables lorsqu'une information comportementale est présente, mais que ce ne soient plus eux qui émergent spontanément lors de la réalisation de la tâche supra-posturale.

L'objectif de l'expérimentation 5 est d'analyser les similitudes et différences des conséquences de l'apprentissage sur les coordinations spontanées et sur les coordinations requises par information comportementale. Pour cela, avant et après l'apprentissage d'une phase relative hanche-cheville de 90°, nous testons, d'une part, les modes de coordination spontanés des participants sur la tâche de poursuite de cible et, d'autre part, l'ensemble de leur dynamique de coordination (balayage) en présence d'une information comportementale. La méthode du balayage permet de parer aux différences individuelles qui peuvent exister quant à la valeur de phase relative des patrons intrinsèques. Dans l'expérimentation 4, les patrons intrinsèques requis étaient établis sur la base de moyennes sur des groupes d'individus. Or, nous avons observé précédemment que les participants pouvaient présenter des différences de coordination spontanée notables sur la tâche de poursuite de cible. Pour le patron intrinsèque en phase, par exemple, il n'est pas rare que les valeurs moyennes individuelles s'étendent de -5° à 50°. Le balayage permet de résoudre le problème de la non adéquation possible entre les coordinations requises et les coordinations intrinsèques. Chaque individu peut trouver une phase relative requise approchant celle qui lui est intrinsèque parmi l'ensemble des patrons proposés lors du balayage.

Le balayage de l'ensemble du diagramme de phase nous permettra d'évaluer si l'évolution de la dynamique de coordination avec la pratique d'un nouveau mode peut expliquer et prédire le patron de coordination émergent lors de la tâche de poursuite de cible. D'après les prédictions théoriques (e.g., Zanone & Kelso, 1994) – et abstraction faite des premiers résultats obtenus dans l'expérimentation 4 – nous pouvons faire l'hypothèse d'une

transition de phase de la dynamique de coordination en conséquence de l'apprentissage. Cette transition devrait se traduire par la création d'un bassin d'attraction autour de la coordination apprise, et pourrait mener à une déstabilisation des patrons intrinsèques initiaux. En conséquence de cette transition, le patron de coordination spontané devrait présenter une modification en direction de la phase relative apprise.

### 3.3.2. Méthode

#### **3.3.2.1. Participants**

Douze participants, 6 filles et 6 garçons, réalisent l'expérimentation de façon bénévole. Ils sont âgés de 20 à 46 ans ( $M = 26.83$ ,  $ET = 8.53$ ), ont une taille moyenne de 173.42 cm ( $ET = 10.41$ ) et un poids moyen de 68.58 kg ( $ET = 12.48$ ). Tous les participants rapportent une vision normale ou corrigée, et une absence de trouble de l'équilibre. Ils sont naïfs par rapport aux objectifs de l'étude et n'ont pas participé aux expérimentations 1, 2, 3 et 4 menées précédemment.

#### **3.3.2.2. Tâches et Dispositif expérimental**

L'expérimentation se compose d'une session d'apprentissage de la phase relative hanche-cheville de 90° et de sessions de test. Elle se déroule sur 4 jours consécutifs, plus un jour une semaine après la pratique, pour un test de rétention. Les sessions de test comprennent deux types de tâche : un test de la coordination spontanée (tâche supra-posturale de poursuite de cible) et un balayage de la dynamique de coordination en présence d'une information comportementale. Comme pour les expérimentations 3 et 4, les participants sont debout, pieds nus écartés à largeur de hanches, face à un écran de 3 m H × 2 m V situé à 1.50 m de distance. Des électro-goniomètres placés sur les centres articulaires de la hanche gauche et de la cheville gauche mesurent les positions angulaires de ces deux articulations à une fréquence de 50 Hz. Un dispositif électrique placé sous le pied du participant signale la perte de contact du talon ou des orteils avec le sol. Les essais pour lesquels plus de deux pertes de contact sont observées sont annulés et repris. Durant toute l'expérimentation, les participants ont pour instruction de garder les genoux tendus et la totalité de la plante des pieds en contact avec le sol.

*Session d'apprentissage et balayage.*

La tâche et le dispositif expérimental pour la session d'apprentissage et le balayage sont presque identiques à l'expérimentation 4 : les participants essaient de faire correspondre leurs mouvements de hanches et de chevilles pour reproduire le patron spécifié sur un écran sous forme d'une figure de Lissajous (voir la Figure 3.1.). La seule différence apportée au dispositif est la mise en place d'une souris à suivre sur la figure de Lissajous. Cette souris correspond à un point qui se déplace le long de la forme imposée de façon à réaliser chaque cycle en 5 s (fréquence de 0.2 Hz). Les participants ont pour instruction de suivre la fréquence de la souris. Le fait d'imposer la fréquence de mouvement permet de limiter les inégalités de performance qui seraient dues à des temps différents passés sur chaque mode de coordination. De plus, nous verrons que c'est aussi un moyen d'harmoniser la fréquence avec la coordination spontanée, lors de la tâche de poursuite de cible. Comme pour l'expérimentation 4, les participants colorient le patron modèle lorsqu'ils se trouvent dans la zone de tolérance présentée à l'écran. Cette zone de tolérance correspond à  $\pm 35\%$  des amplitudes des hanches et des chevilles de  $8^\circ$  spécifiées par le modèle. Lors de la session d'apprentissage, le seul patron pratiqué est de  $90^\circ$ . Lors des sessions de test de la disposition des attracteurs (balayage), 12 phases relatives à produire sont requises par palier de  $30^\circ$  :  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $230^\circ$ ,  $260^\circ$ ,  $300^\circ$ , et  $330^\circ$ . Les formes correspondant à ces patrons sur la figure de Lissajous sont représentées Figure 3.15.

*Test des coordinations spontanées.*

Lors des sessions de test des coordinations spontanées, une cible carrée multicolore ( $54 \text{ cm} \times 54 \text{ cm}$ ) sur fond noir est présentée sur l'écran à la place de la figure de Lissajous. Comme pour les expérimentations 1 et 2, l'expansion et la contraction de cette cible simulent son oscillation sur un axe antéropostérieur, et les participants ont pour instruction de garder une distance constante entre leur tête et la cible. Afin d'exclure toute différence relative à la vitesse d'exécution sur les tâches spontanées vs. requises, la fréquence de mouvement de la cible est identique à celle imposée par la souris sur la figure de Lissajous, à savoir 0.2 Hz. Lors des expérimentations précédentes menées sur cette tâche (e.g., Bardy et al., 1999, 2002), les modes de coordination en phase et en anti-phase émergeaient de façon systématique dans des conditions de réalisation variées. Nous avons cherché à faire apparaître ces deux patrons spontanés, tout en conservant une fréquence de mouvement identique à celle qui était imposée lors du balayage. Pour cela, chaque participant est testé sur deux amplitudes de cible : une petite amplitude (8 cm pic à pic), et une grande amplitude (25 cm pic à pic). Ces amplitudes



sont choisies sur la base des observations expérimentales faites par Bardy et collaborateurs. Par exemple, Bardy et al. (1999) montrent que pour une fréquence de cible de 0.2 Hz (i.e., identique à la nôtre), des amplitudes de cible inférieures à 14 cm favorisent l'émergence du patron intrinsèque en phase alors que des amplitudes de cible supérieures à 18 cm favorisent l'émergence de l'anti-phase. Nous nous sommes assurés par le calcul de la position du centre de masse par rapport au polygone de sustentation que n'importe quelle phase relative hanche-cheville permettait d'atteindre les amplitudes de tête requises par le mouvement de la cible (i.e., 8 cm et 25 cm) tout en restant en équilibre debout. Durant les essais sur la tâche de poursuite de cible, les déplacements de la tête sont enregistrés à une fréquence de 50 Hz grâce à un système d'acquisition électromagnétique (Flock of Birds, Ascension Technologies, Inc., Burlington, VT). Le récepteur de ce système est fixé sur un serre-tête placé sur la tête du participant.

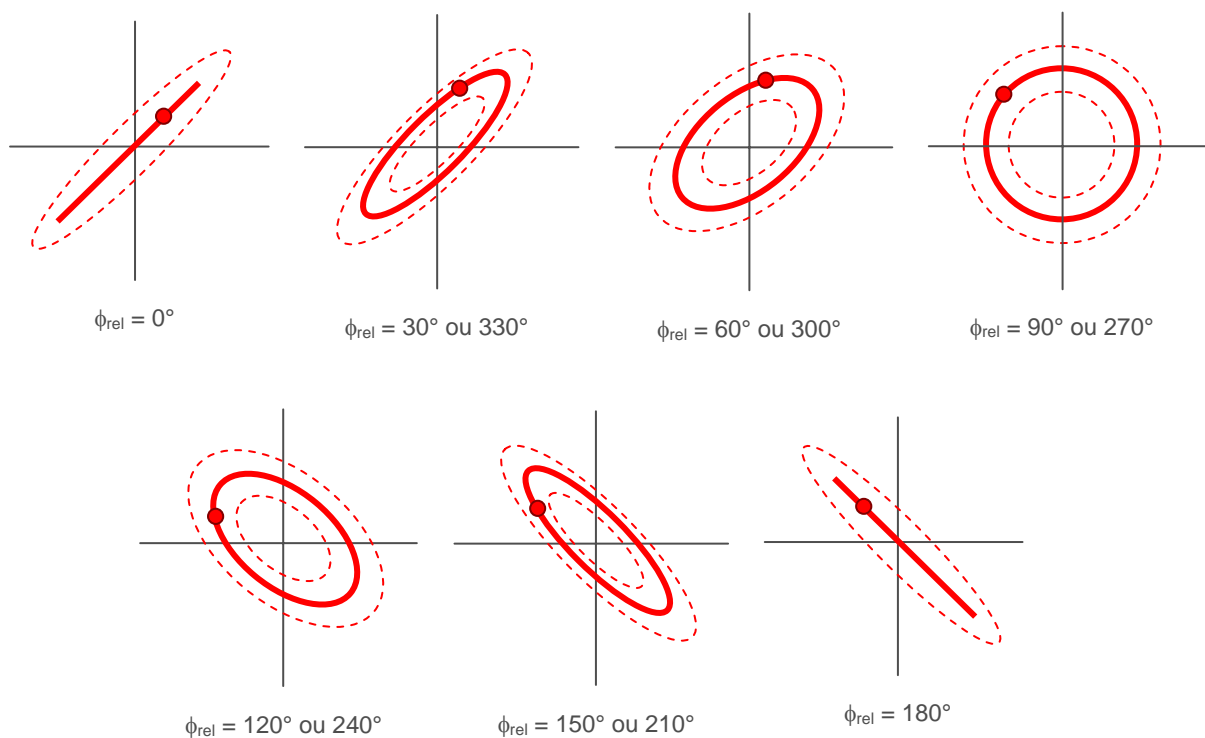
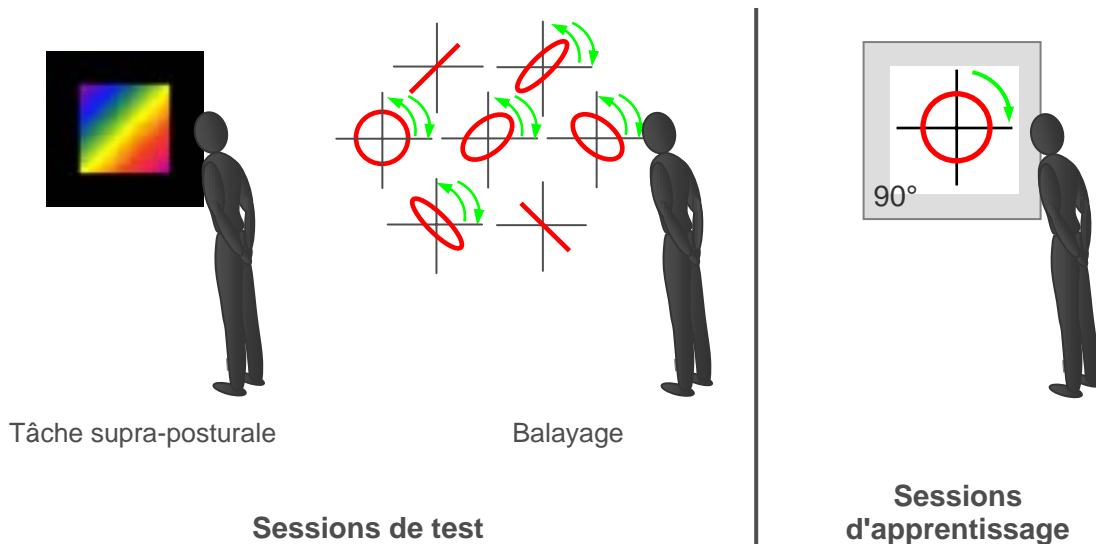


Figure 3.15. Forme des 12 patrons requis lors du balayage et leur zone de tolérance sur la figure de Lissajous. Le point représenté sur les formes correspond à la souris à suivre. Pour les valeurs de phase relative comprises dans l'intervalle  $]0^\circ ; 180^\circ[$ , la forme doit être tracé dans le sens des aiguilles d'une montre, alors que pour l'intervalle  $]180^\circ ; 360^\circ[$ , le mouvement se fait dans le sens inverse.



Session	Pré-T	App	App	App	Post-T	Rét
Nbr d'essais	6 × 2 amplitudes + 3 × 12 patrons	25	25	10	6 × 2 amplitudes + 3 × 12 patrons	6 × 2 amplitudes + 3 × 12 patrons
Jour	1	2	3	4	4	5

Figure 3.16. Protocole de l'expérimentation 5. Partie supérieure : Tâches lors des sessions de test (pré-test, post-test et rétention) et d'apprentissage. Lors des sessions de test, les participants doivent réaliser 6 essais de 8 cycles sur la tâche supra-posturale pour 2 amplitudes de cible (8 cm et 25 cm), ainsi que 3 essais de 8 cycles sur 12 phases relatives différentes (balayage par palier de 30°). Les sessions d'apprentissage, réparties sur les jours 2, 3 et 4, contiennent en tout 60 essais de pratique de la phase relative de 90° (soit 480 cycles). Partie inférieure : Organisation des sessions expérimentales (Pré-T : pré-test ; App : sessions d'apprentissage ; Post-T : post-test ; Rét : test de rétention), et nombre d'essai par session sur les cinq jours. Les jours 1, 2, 3 et 4 sont consécutifs. Le test de rétention est mené une semaine après la pratique.

### 3.3.2.3. Procédure

L'expérimentation se déroule sur cinq jours (Figure 3.16.). La session du premier jour dure environ une heure. Les participants sont d'abord testés sur la tâche de poursuite de cible. Ils réalisent 6 essais de 8 cycles pour chaque amplitude de cible (8 cm et 25 cm). Ensuite, ils effectuent un quart d'heure de familiarisation avec le dispositif expérimental donnant le feedback augmenté (figure de Lissajous). La période de familiarisation est totalement identique à celle des expérimentations 3 et 4, et permet de calculer les centres d'oscillation des hanches et des chevilles sur lesquels seront centrés les patrons de coordination requis ultérieurement. A la suite des 15 minutes de familiarisation, les participants réalisent la

session de balayage tous les 30° de phase relative. Ils effectuent 3 essais de 8 cycles pour chacun des 12 patrons de coordination. Afin d'éviter tout effet d'ordre de passation, les différents patrons sont présentés de façon randomisée. Le deuxième jour a lieu la première session d'apprentissage du mode de 90°. Les participants effectuent 25 essais de 8 cycles avec présence du feedback augmenté (figure de Lissajous). Le troisième jour est identique au deuxième, avec 25 essais de pratique de 90°. La durée de la pratique pour les jours 2 et 3 est d'approximativement 35 minutes. Le jour 4 (d'une durée d'une heure environ) est composé de la fin de la période d'apprentissage (10 essais) et du post-test, qui reprend 6 essais pour les deux amplitudes de cible de la tâche supra-posturale ainsi que le balayage grâce à la figure de Lissajous (3 essais pour chacun des 12 patrons de coordination requis). Une semaine après le jour 4, les participants reviennent au laboratoire pour effectuer un test de rétention d'une durée de 45 minutes. Ce test de rétention comprend les mêmes tâches (tâche supra-posturale et balayage) et le même nombre d'essais que le pré-test et le post-test.

#### 3.3.2.4. Variables dépendantes

Après avoir filtré les données des électro-goniomètres grâce à un filtre passe-bas (fréquence de coupure de 2 Hz) et exclu le premier cycle de chaque essai, quatre variables dépendantes sont calculées : (i) la phase relative,  $\phi_{rel}$ , entre les hanches et les chevilles, (ii) son écart-type,  $ET\phi_{rel}$ , (iii) l'erreur constante,  $EC$ , qui correspond à la différence entre la phase relative produite et la phase relative requise, et (iv) l'erreur absolue,  $EA$ , qui correspond à la valeur absolue de l'erreur constante. Ces variables sont calculées de la même façon que dans les expérimentations 3 et 4. Le calcul de l'erreur constante et de l'erreur absolue ne concerne pas les essais sur la tâche de poursuite de cible, étant donné qu'ils ne requièrent pas de patron particulier. Par contre, pour ces essais, nous calculons l'amplitude des mouvements de la tête (position maximale - position minimale pour chaque cycle).

Lors des sessions de test, le nombre d'essais sur la tâche de poursuite de cible (6 essais par amplitude) est supérieur à celui réalisé sur chaque patron de coordination pour le balayage (3 essais). En effet, par rapport au cas où la coordination est requise, la nature spontanée de la tâche supra-posturale rend plus difficile l'obtention d'indices statistiques fiables. Pour l'analyse de la coordination spontanée, nous choisissons donc d'analyser les 3 essais les plus stables sur les 6 réalisés (écarts-types de phase relative les plus faibles). Cette méthode vise à limiter le nombre de participants exclus des analyses sur la base de tests de non uniformité de Rayleigh non significatifs.

Comme pour les expérimentations 1 à 4, nous utilisons des tests de Watson-Williams sur  $\phi_{rel}$  ou lorsque des analyses par paires suffisent, et des ANOVAs lorsque plusieurs facteurs ou plusieurs niveaux d'un même facteur sont mis en jeu dans l'analyse.

### 3.3.3. Résultats

En premier lieu, nous analysons la dynamique de coordination initiale présentée par les participants (patrons spontanés et requis lors du pré-test), puis nous examinerons l'évolution du patron produit au cours des trois jours de pratique de 90°. Nous évaluerons ensuite les conséquences de l'apprentissage sur les patrons de coordination spontanés et sur le balayage, avant de finir par l'amplitude des mouvements de la tête.

#### **3.3.3.1. Comportement initial**

*Coordinations spontanées : tâche de poursuite de cible.*

La tâche de poursuite de cible avait pour but d'amener les participants à coordonner les hanches et les chevilles sans leur imposer le mode de coordination à produire. Cette tâche supra-posturale permet ainsi de faire émerger les coordinations *spontanées* des participants en favorisant l'émergence de la phase vs. de l'anti-phase grâce à l'utilisation de deux amplitudes de cible.

Pour l'amplitude de cible de 8 cm, les tests de non uniformité de Rayleigh menés pour chaque participant sur les phases relatives produites montrent que 11 participants sur les 12 présentent une coordination hanche-cheville directionnelle ( $p < .05$ ), c'est-à-dire significativement non uniforme. Pour le douzième participant, les phases relatives produites sont uniformément distribuées, ce qui rend non pertinente la phase relative moyenne calculée. Sur les 11 participants présentant une coordination orientée, 7 produisent un patron hanche-cheville en phase, avec des phases relatives moyennes individuelles allant de  $-11.07^\circ$  à  $59.10^\circ$ . Pour ces 7 participants en phase sur l'amplitude de cible de 8 cm, la phase relative moyenne du groupe au pré-test est de  $28.81^\circ$  ( $ET\phi_{rel} = 41.18^\circ$ ) avec un intervalle de confiance à 95% compris entre  $18.98^\circ$  et  $38.64^\circ$ . Les 4 autres participants produisent un mode en anti-phase avec des phases relatives moyennes individuelles comprises entre  $175.19^\circ$  et  $201.37^\circ$ .

Pour ces 4 participants, la phase relative moyenne du groupe au pré-test est de  $186.73^\circ$  ( $ET\phi_{rel} = 21.97^\circ$ ) avec un intervalle de confiance compris entre  $180.73^\circ$  et  $192.73^\circ$ .

Pour l'amplitude de cible de 25 cm, tous les participants produisent des phases relatives significativement non uniformes (test de Rayleigh,  $p < .05$ ). 3 participants sur les 7 en phase pour l'amplitude de 8 cm sont aussi en phase pour l'amplitude de 25 cm. Leurs phases relatives moyennes individuelles sont comprises entre  $37.50^\circ$  et  $54.08^\circ$ . La phase relative moyenne de ce groupe de 3 participants est de  $44.28^\circ$  ( $ET\phi_{rel} = 30.94^\circ$ ) avec un intervalle de confiance à 95% compris entre  $34.53^\circ$  et  $54.02^\circ$ . Les 9 autres participants produisent une coordination en anti-phase lorsque l'amplitude de cible est de 25 cm, avec des valeurs de phases relatives moyennes individuelles s'échelonnant de  $169.24^\circ$  à  $190.28^\circ$ . Pour ce groupe de participants, la phase relative moyenne est de  $176.76^\circ$  ( $ET\phi_{rel} = 18.35^\circ$ ) avec un intervalle de confiance compris entre  $173.56^\circ$  et  $179.97^\circ$ .

Les coordinations observées correspondent en majorité aux patrons attendus. Le fait que la totalité des sujets n'effectue pas un mode en phase lorsque l'amplitude de cible est de 8 cm et un mode en anti-phase lorsqu'elle est de 25 cm, est compatible avec les résultats obtenus précédemment par Bardy et collaborateurs (e.g., 1999). En effet, selon les individus, le seuil d'amplitude auquel la coordination hanche-cheville bifurque d'un patron intrinsèque à l'autre est très variable.

#### *Coordinations requises : balayage.*

Afin de connaître la capacité des participants à produire différents patrons hanches-chevilles répartis sur l'ensemble des coordinations possibles, nous réalisons un balayage qui impose 12 phases relatives comprises entre  $0^\circ$  et  $330^\circ$ , espacées d'un pas de  $30^\circ$ . Nous présentons dans un premier temps les analyses du groupe de 12 participants lors du pré-test, puis nous mettrons en évidence des différences individuelles sur les dynamiques de coordination observées.

Les valeurs moyennes d'erreur constante, d'erreur absolue, et d'écart-type de la phase relative sont représentées sur la Figure 3.17. pour le groupe des 12 participants. L'erreur constante suit une pente négative très marquée qui passe par une valeur proche de 0 pour la phase relative requise de  $180^\circ$ . Cette pente négative indique d'une part, que c'est pour ce

patron que l'erreur constante est la plus faible, mais surtout que les modes de coordination voisins de l'anti-phase sont attirés vers cette valeur. Ainsi, les participants surestiment les valeurs de phases relatives qui sont inférieures à  $180^\circ$  ( $EC > 0$ ), et sous-estiment celles qui sont supérieures ( $EC < 0$ ), ce qui révèle la présence d'un attracteur pour le patron de  $180^\circ$ .

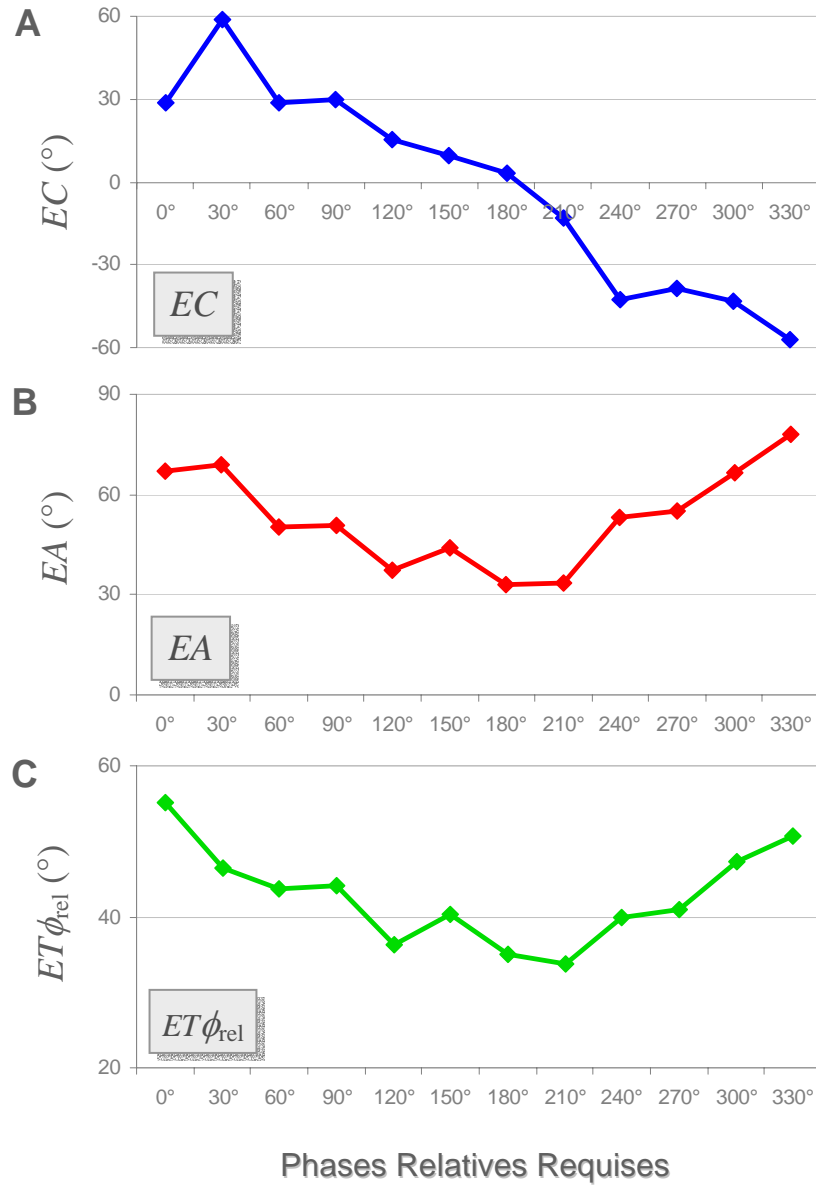


Figure 3.17. Moyennes du groupe expérimental pour les variables caractérisant le patron de coordination produit en fonction de la phase relative requise. A : Erreur constante,  $EC$ , indiquant la direction de l'erreur. B : Erreur absolue,  $EA$ , indiquant l'importance de l'erreur. C : Ecart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , indiquant la stabilité du patron produit.

L'erreur absolue et l'écart-type de la phase relative présentent des caractéristiques similaires en fonction des patrons de coordination requis : l'importance de l'erreur et la variabilité sont minimales pour des valeurs de phases relatives requises de 180° et 210°, et augmentent (performance moindre) au fur et à mesure que les phases relatives requises s'éloignent de ces valeurs. Des ANOVAs avec mesures répétées (patrons requis) sont réalisées sur les indices de performance de la coordination produite ( $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ ) pour le pré-test. Elles indiquent un effet du patron sur la performance pour  $EC$  ( $F(11, 121) = 4.48, p < .05$ ),  $EA$  ( $F(11,121) = 7.03, p < .05$ ), et  $ET\phi_{rel}$  ( $F(11,121) = 4.08, p < .05$ ). Ainsi, tous les patrons ne sont pas réalisés avec la même précision et la même stabilité.

L'observation des courbes individuelles pour le balayage du pré-test révèle trois types de dynamique de coordination. Les valeurs d'erreur constante et d'erreur absolue de participants représentatifs de ces trois types de comportement sont présentées dans la Figure 3.18. Les résultats moyens du groupe traduisent de façon très juste le comportement de 5 participants sur les 12 (Figure 3.18.A). Comme pour les moyennes du groupe, ces participants présentent une pente négative centrée autour de la phase relative requise de 180° ( $\pm 30^\circ$ ), et une erreur absolue en forme de V, avec des valeurs minimales pour des phases relatives requises comprises entre 150° et 210°. Ces participants présentent une attraction forte pour le patron en anti-phase. 3 participants présentent également une pente d'erreur constante négative, mais avec une inclinaison faible et qui est proche d'une valeur nulle pour de nombreuses phases relatives requises, comprises entre 60° et 210°. Pour ces participants, l'erreur absolue est également minimale et indifférenciée lorsque les patrons de 60° à 210° sont demandés (Figure 3.18.B). Contrairement aux participants du premier sous-groupe identifié, ces 3 participants ne sont pas seulement performants sur les patrons proches de l'anti-phase, mais sur une gamme de phases relatives relativement étendue. Enfin, pour 4 participants, l'erreur constante est faible et peu différenciée sur presque tous les patrons requis, et l'erreur absolue varie de façon désordonnée sans valeur minimale identifiable (Figure 3.18.C). Ces participants ne présentent pas de patron préférentiel parmi les différentes phases relatives requises, et produisent de façon relativement performante la majorité des patrons demandés.

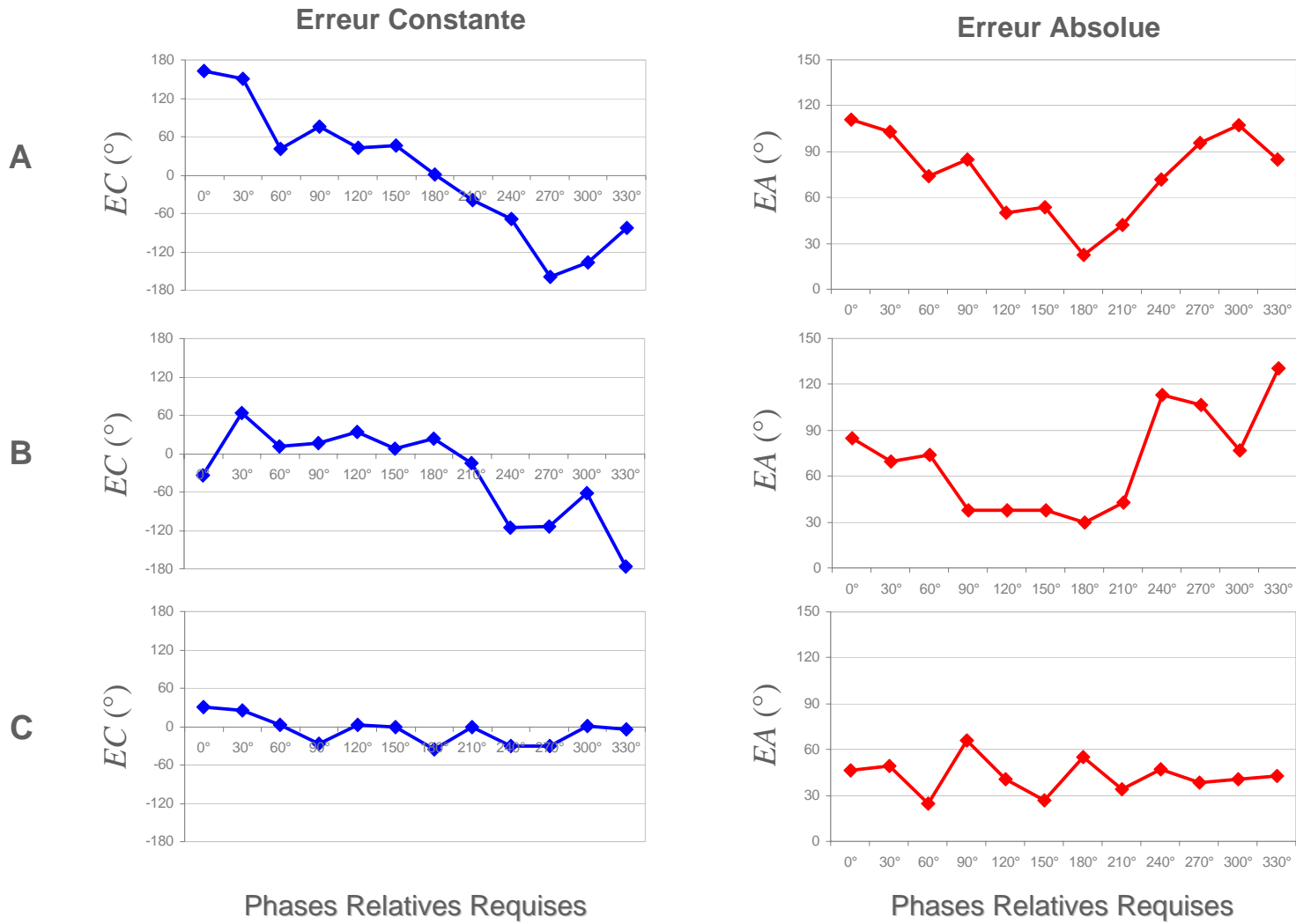


Figure 3.18. Valeurs d'erreur constante (à gauche) et d'erreur absolue (à droite) pour 3 participants représentatifs de différents types de dynamique de coordination (voir le texte).



### 3.3.3.2. Session d'apprentissage

Pour la représentation graphique et les analyses statistiques, les essais d'apprentissage de  $90^\circ$  sont groupés par bloc de 5. La Figure 3.19. présente les valeurs moyennes d'erreur constante, d'erreur absolue et d'écart-type de la phase relative obtenues par le groupe expérimental lors des 12 blocs de pratique. Bien qu'inclus dans le balayage, le test de  $90^\circ$  lors de la session de rétention est également représenté. Contrairement aux blocs d'apprentissage, il comprend 3 essais.

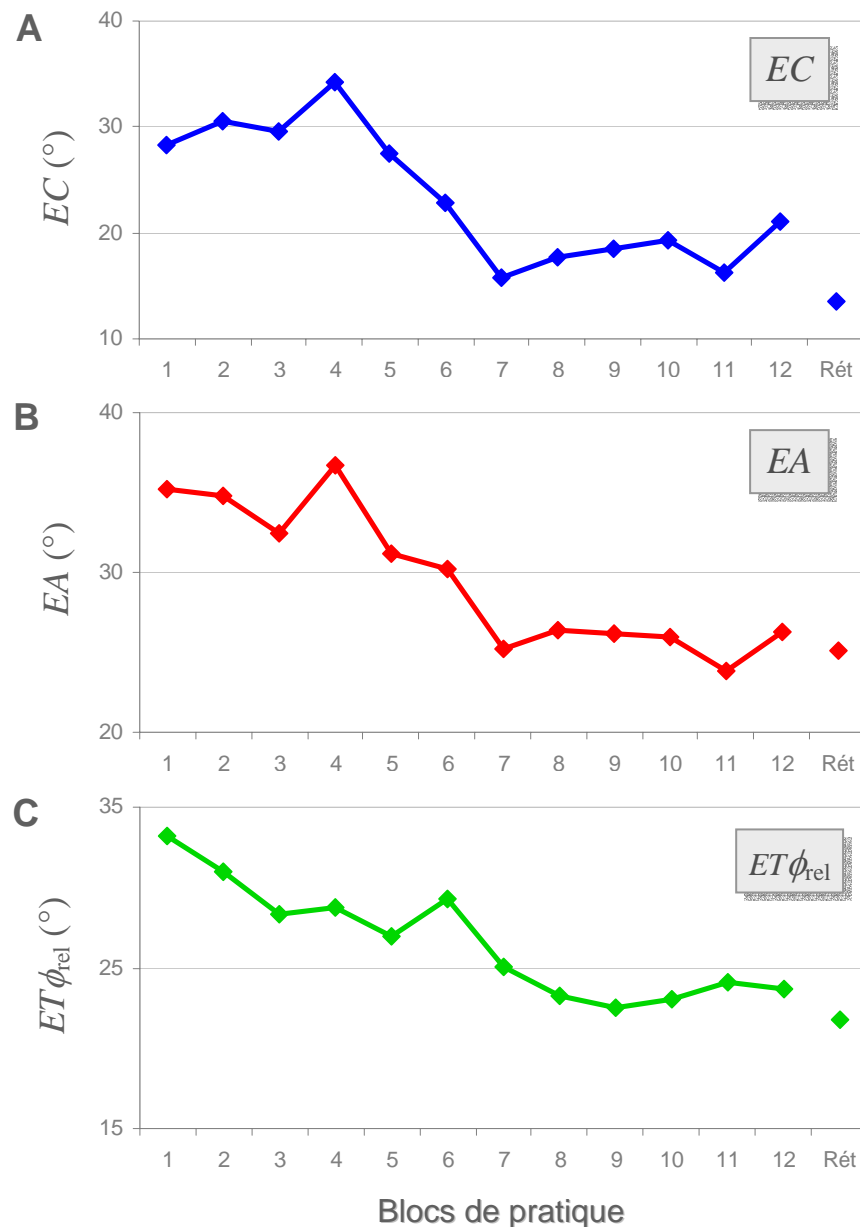


Figure 3.19. Evolution (A) de l'erreur constante,  $EC$ , (B) de l'erreur absolue,  $EA$ , et (C) de l'écart-type de la phase relative,  $ET\phi_{rel}$ , avec les blocs de pratique de  $90^\circ$ . Chaque bloc de pratique contient 5 essais, et le test de rétention (Rét) en contient 3.

Nous pouvons constater une amélioration des trois indices de performance avec la pratique de 90°. Cette diminution est confirmée par des ANOVAs avec mesures répétées (12 blocs de pratique) qui révèlent un effet du bloc d'apprentissage sur  $EC$  ( $F(11, 121) = 3.68, p < .05$ ),  $EA$  ( $F(11, 121) = 5.05, p < .05$ ), et  $ET\phi_{rel}$ , ( $F(11, 121) = 6.32, p < .05$ ). Comme pour l'expérimentation 4, nous pouvons constater que le patron de 90° reste néanmoins surestimé à l'issue des 480 cycles d'oscillation (8 cycles  $\times$  12 blocs  $\times$  5 essais). L'erreur constante conserve une valeur positive tout au long de la pratique et atteint une valeur moyenne de 21.12° lors du bloc 12, soit une valeur de phase relative de 111.12°. La performance pour le test de rétention sera présentée lors de l'analyse des conséquences de l'apprentissage sur le test de balayage.

Afin d'analyser les résultats de façon individuelle, nous réalisons des tests de Watson-Williams comparant, pour chaque participant,  $EA$  (importance de l'erreur) et  $ET\phi_{rel}$  (stabilité du patron produit) entre le premier et le dernier bloc de pratique. Comme pour les expérimentations 1 et 2, quatre types de comportement peuvent être distingués. Chaque sous-groupe est constitué de 3 participants. Pour le premier sous-groupe, les participants présentent une diminution significative de  $EA$  entre le début et la fin de la pratique ( $F_s(1, 68) > 4.37, p < .05$ ) sans modification de  $ET\phi_{rel}$  ( $F_s(1, 8) < 2.84, ns$ ). Pour 3 autres participants, c'est la diminution de  $ET\phi_{rel}$  qui est significative ( $F_s(1, 8) > 9.90, p < .05$ ) sans modification de  $EA$  ( $F_s(1, 68) < 1.59, ns$ ). Les 3 participants du troisième sous-groupe s'améliorent à la fois sur  $EA$  ( $F_s(1, 68) > 13.03, p < .05$ ) et sur  $ET\phi_{rel}$  ( $F_s(1, 8) > 5.70, p < .05$ ). Pour finir, les 3 derniers participants ne présentent pas de progrès significatif sur le patron de 90° car, dès les 5 premiers essais de pratique, ils produisent un patron précis (phase relative moyennes individuelles de 89.07°, 97.05° et 98.20° pour le bloc 1) et stable (écart-type de phase relative moyens individuels de 20.24°, 23.43° et 22.54° pour le bloc 1). Lors du bloc 1, ces 3 participants présentent les erreurs absolues les plus faibles, et font partie des 5 participants les plus stables du groupe expérimental. Pour ces participants, les tests de Watson-Williams comparant les blocs 1 et 12 ne sont significatifs ni pour  $EA$  ( $F_s(1, 68) < 3.27, ns$ ), ni pour  $ET\phi_{rel}$  ( $F_s(1, 8) < 1, ns$ ). Il est intéressant de noter que contrairement à ce qui pouvait être attendu, les 5 participants qui présentaient une attraction forte vers le patron de 180° lors du balayage du pré-test (voir la Figure 3.18.A) ne sont pas les moins précis ou les moins stables du groupe expérimental, que ce soit lors du bloc 1 ou du bloc 12. La présence d'un fort attracteur initial en anti-phase ne semble pas

rendre la production et l'apprentissage du patron de 90° plus difficile que pour les autres participants.

### 3.3.3.3. Session de test : conséquences de l'apprentissage de 90°

Intéressons-nous maintenant aux conséquences de l'apprentissage du mode de 90° sur les coordinations spontanées en premier lieu (tâche supra-posturale de poursuite de cible), et sur les coordinations requises dans un deuxième temps (balayage).

#### 3.3.3.3.1. Modification des patrons de coordination spontanés

Les tests de Watson-Williams (comparaisons par paires) menés par groupe de participants révèlent un effet de l'apprentissage de 90° sur la phase relative spontanée. Pour le groupe de 7 participants en phase au pré-test pour l'amplitude de cible de 8 cm, les phases relatives moyennes au pré-test ( $28.81^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 41.17^\circ$ ), au post-test ( $99.39^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 27.82^\circ$ ) et au test de rétention ( $135.98^\circ$ ,  $ET\phi_{rel} = 26.84^\circ$ ) diffèrent toutes significativement les unes des autres ( $F_s(1, 292) > 10.62$ ,  $p < .05$ ). De la même façon, pour le groupe de 9 participants en anti-phase au pré-test pour l'amplitude de cible de 25 cm, les phases relatives produites lors du pré-test ( $\phi_{rel} = 176.76^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 18.35^\circ$ ), du post-test ( $\phi_{rel} = 142.73^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 21.88^\circ$ ), et du test de rétention ( $\phi_{rel} = 162.85^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 15.69^\circ$ ) diffèrent également de façon significative ( $F_s(1, 376) > 12.13$ ,  $p < .05$ ). Il est intéressant de noter que pour les deux groupes que nous venons de présenter, si la variabilité intra-individuelle a tendance à diminuer au cours des sessions de test (valeurs de  $ET\phi_{rel}$  indiquées entre parenthèses), la variabilité inter-individuelle augmente de façon importante : pour le premier groupe présenté, elle passe d'une valeur de  $58.32^\circ$  au pré-test à  $91.18^\circ$  lors du test de rétention (valeur de  $99.39^\circ$  au post-test), et pour le deuxième groupe, elle est de  $22.48^\circ$  au pré-test et de  $51.07^\circ$  lors du test de rétention (valeur de  $49.92^\circ$  au post-test). Cette augmentation traduit une différenciation importante des comportements individuels à l'issue de l'apprentissage du patron de 90°. Nous présentons ci-dessous les analyses individuelles mettant en évidence les différentes modifications des patrons spontanés selon les participants.

Des tests de Watson-Williams effectués de façon individuelle montrent que 8 participants (sur les 12) présentent un changement significatif de la phase relative spontanée initiale (pré-test) sur au moins une des deux amplitudes de cible testées. Pour 5

de ces 8 participants, cette modification est observée à la fois sur les amplitudes de cible de 8 cm et de 25 cm. 4 participants ne présentent aucune modification de la coordination spontanée, quelque soit l'amplitude de cible. Les phases relatives moyennes individuelles sont présentées dans le Tableau 3.1. Nous détaillons ci-dessous les différentes évolutions observées pour l'amplitude de cible de 8 cm dans un premier temps, puis pour l'amplitude de 25 cm.

Participants	Amplitude de cible = 8 cm			Amplitude de cible = 25 cm		
	Pré-test	Post-test	Rétention	Pré-test	Post-test	Rétention
1	55.78	91.38*	107.63*	54.08	108.22*	129.94*
2	40.46	146.05*	104.36*	169.24	103.62*	166.53
3	-5.46	186.70*	189.60*	176.47	172.30	182.96
4	45.06	71.73*	109.57*	190.28	139.63*	146.57*
5	59.10	32.55	123.04*	37.50	71.34*	67.40*
6	175.19	172.99	190.12	180.44	175.91	177.24
7	191.37	172.14	164.41	175.51	174.16	181.96
8	199.31	190.66	192.27	187.04	104.09*	194.28
9	184.55	185.32	182.43	182.34	143.20*	142.37*
10	-11.07	14.46	254.24*	39.83	1.61*	-2.07*
11	Rayleigh, <i>ns</i>	72.93	86.84	169.93	89.37*	85.23*
12	3.95	55.08*	56.55*	157.00	101.79*	87.60*

Tableau 3.1. Moyennes des phases relatives individuelles des 12 participants pour les trois sessions de test (pré-test, post-test, et test de rétention) et les deux amplitudes de cible (8 cm et 25 cm). Les astérisques indiquent une différence significative par rapport au pré-test. Lorsque la coordination hanche-cheville initiale (pré-test) est en phase, les cases sont grisées.

#### Amplitude de cible de 8 cm.

Lors du pré-test sur la petite amplitude de cible, 7 participants présentaient un patron en phase (participants grisés sur la partie gauche du Tableau 3.1.), 4 en anti-phase, et un participant produisait une coordination instable sans tendance identifiable (test de Rayleigh non significatif, participant 11 dans le Tableau 3.1.). Pour les 7 participants en phase sur l'amplitude de cible de 8 cm, trois types de comportements ont été observés (Figure 3.20.). Tout d'abord, à l'issue de l'apprentissage de 90°, 5 participants sur les 7 initialement en phase (participants 1, 2, 4, 5, et 12 dans le Tableau 3.1.) bifurquent en

direction du patron appris ( $F_s(1, 40) > 9.12, p < .05$ ). Pour ce groupe de participants, la phase relative moyenne passe de  $42.61^\circ$  au pré-test ( $ET\phi_{rel} = 41.55^\circ$ ) à  $94.04^\circ$  au post-test ( $ET\phi_{rel} = 30.11^\circ$ ),  $F(1, 208) = 32.98, p < .05$ . La valeur atteinte lors du post-test est conservée lors du test de rétention ( $\phi_{rel} = 97.05^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 30.28^\circ$ ),  $F(1, 208) < 1, ns$ . L'intervalle de confiance à 95% contient  $90^\circ$  lors du post-test ( $69.47^\circ < \phi_{rel} < 109.17^\circ$ ) et du test de rétention ( $80.25^\circ < \phi_{rel} < 113.84^\circ$ ), ce qui n'était pas le cas lors du pré-test ( $32.17^\circ < \phi_{rel} < 53.04^\circ$ ).

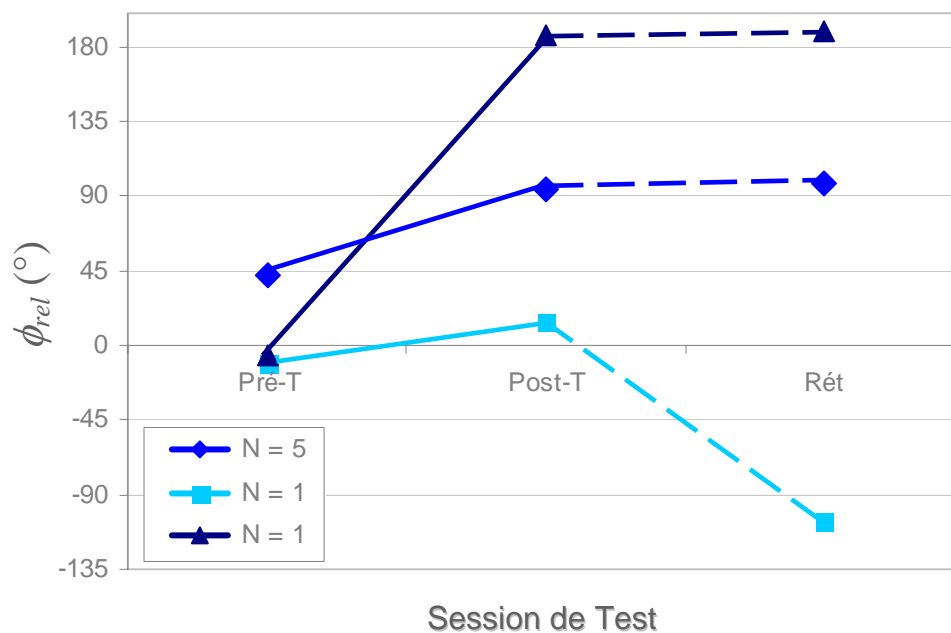


Figure 3.20. Evolution de la phase relative moyenne spontanée sur les trois sessions de test (pré-test : Pré-T ; post-test : Post-T ; test de rétention : Rét) pour les 7 participants en phase sur l'amplitude de cible de 8 cm au pré-test (voir le texte).

Un des participant (participant 10 dans le Tableau 3.1.) présente une modification en direction du mode symétrique au patron appris qui a lieu lors du test de rétention. Pour ce participant, la phase relative moyenne produite lors du pré-test ( $\phi_{rel} = -11.07^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 50.43^\circ$ ), ne change pas de façon significative lors du post-test ( $\phi_{rel} = 14.46^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 27.34^\circ$ ),  $F(1, 40) = 2.02, ns$ . Par contre la phase relative produite lors du test de rétention ( $\phi_{rel} = -105.76^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 26.35^\circ$ ) est significativement modifiée par rapport au pré-test ( $F(1, 40) = 23.78, p > .05$ ), et ce, dans une direction opposée à celle du patron appris. Le

dernier participant du groupe de 7 initialement en phase pour l'amplitude de cible de 8 cm, présente une phase relative moyenne de  $-5.46^\circ$  au pré-test ( $ET\phi_{rel} = 30.03^\circ$ ), et passe vers le patron intrinsèque en anti-phase lors du post-test ( $\phi_{rel} = 186.71^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 17.08^\circ$ ),  $F(1, 40) = 210.42$ ,  $p > .05$ . Il conserve ce patron en anti-phase lors du test de rétention ( $\phi_{rel} = 189.60^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 10.34^\circ$ ) : la comparaison de la phase relative produite n'est pas significative entre le post-test et le test de rétention ( $F(1, 40) < 1$ , *ns*). Ce participant change donc de patron intrinsèque sur l'amplitude considérée, mais ne produit pas un mode de coordination qui était non spontané initialement. Il est probable que ce changement entre patrons intrinsèques pour une même amplitude de cible ne soit pas dû à l'apprentissage du patron de  $90^\circ$ .

Pour les 4 participants en anti-phase sur l'amplitude de cible de 8 cm au pré-test, les analyses individuelles ne révèlent pas de changement significatif après la période d'apprentissage de  $90^\circ$  ( $F_s(1, 40) < 3.10$ , *ns*). Les phases relatives moyennes pour ce groupe de 4 participants sont de  $186.73^\circ$  au pré-test ( $ET\phi_{rel} = 21.97^\circ$ ), de  $180.34^\circ$  au post-test ( $ET\phi_{rel} = 12.83^\circ$ ), et de  $182.25^\circ$  lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 12.85^\circ$ ). Les tests de Watson-Williams réalisés par paire pour le groupe de 4 participants confirment qu'il n'y a pas de changement significatif de la phase relative produite lors des différentes sessions de test,  $F_s(1, 166) < 2.90$ , *ns*.

#### *Amplitude de cible de 25 cm.*

Pour l'amplitude de cible de 25 cm, nous avons observé que 9 participants (sur les 12) produisaient une coordination hanche-cheville en anti-phase au pré-test, alors que 3 participants, déjà en phase sur l'amplitude de cible de 8 cm, conservaient ce mode pour la haute amplitude de cible (participants grisés sur la partie droite du Tableau 3.1.). La Figure 3.21. montre l'évolution du patron de coordination spontané sur les 3 sessions de test pour les 9 participants initialement en anti-phase. Trois comportements peuvent être distingués. Premièrement, sur ces 9 participants, les analyses individuelles montrent que 4 participants (participants 4, 9, 11 et 12 dans le Tableau 3.1.) présentent une déviation significative de la phase relative produite entre le pré-test et le post-test ( $F_s(1, 40) > 6.95$ ,  $p < .05$ ) et maintiennent ce patron modifié lors du test de rétention ( $F_s(1, 40) < 1.06$ , *ns*, entre le post-test et le test de rétention). Pour ce groupe de 4 participants, la phase relative moyenne est de  $175.50^\circ$  lors du pré-test ( $ET\phi_{rel} = 23.21^\circ$ ),  $128.48^\circ$  lors du post-test ( $ET\phi_{rel} = 21.54^\circ$ ), et

117.48° lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 25.82^\circ$ ). Les tests de Watson-Williams menés sur la phase relative produite pour le groupe de 4 participants montrent une différence significative entre le pré-test et le post-test,  $F(1, 166) = 51.80, p > .05$ , mais pas entre le post-test et le test de rétention,  $F(1, 166) = 1.35, ns$ .

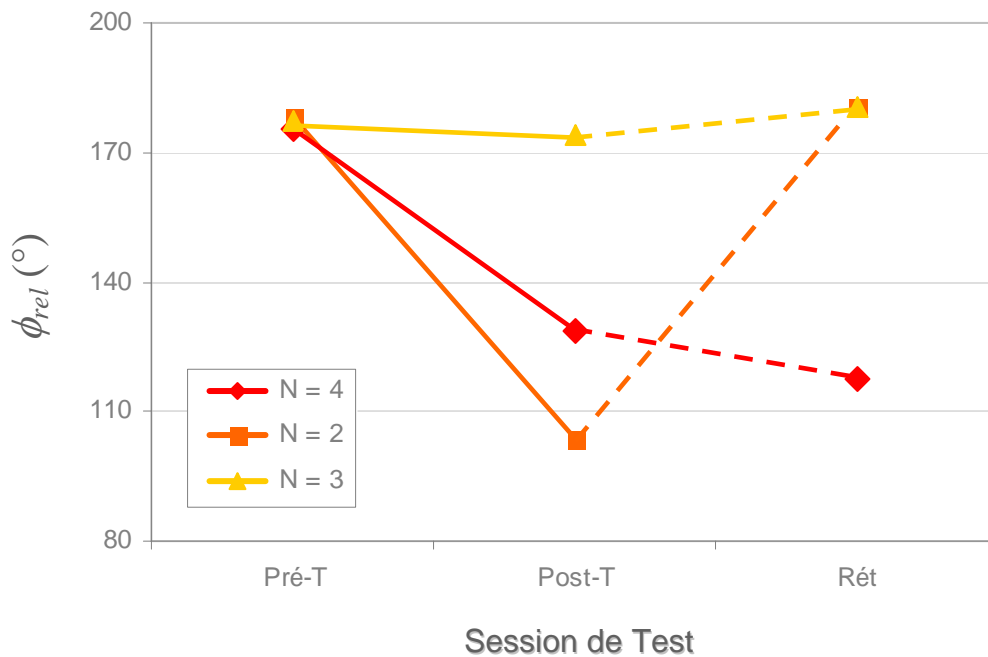


Figure 3.21. Evolution de la phase relative moyenne spontanée sur les trois sessions de test (pré-test : Pré-T ; post-test : Post-T ; test de rétention : Rét) pour les 9 participants en anti-phase sur l'amplitude de cible de 25 cm au pré-test (voir le texte).

Deuxièmement, deux autres participants du groupe de 9 initialement en anti-phase (participants 2 et 8 dans le Tableau 3.1.) présentent également une modification du patron spontané en direction du patron appris lors du post-test ( $F_s(1, 40) > 37.49, p < .05$ , entre le pré-test et le post-test), mais reviennent à un mode proche leur coordination initiale lors du test de rétention ( $F_s(1, 40) < 2.97, ns$ , entre le pré-test et le test de rétention). Pour ce groupe de deux participants, la phase relative moyenne est de 178.04° lors du pré-test ( $ET\phi_{rel} = 11.65^\circ$ ), 103.82° lors du post-test ( $ET\phi_{rel} = 40.59^\circ$ ), et 180.66° lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 8.19^\circ$ ). Les modifications de la phase relative et de l'écart-type de la phase relative entre le pré-test et le post-test sont significatives,  $F(1, 82) = 89.95, p > .05$ , et  $F(1, 10) = 47.95, p > .05$ , pour  $\phi_{rel}$  et  $ET\phi_{rel}$ , respectivement. Par contre, la comparaison

entre le pré-test et le test de rétention ne montre pas de différence, que ce soit pour la phase relative,  $F(1, 82) < 1$ , *ns*, ou son écart-type,  $F(1, 10) = 3.95$ , *ns*.

Pour finir, les 3 derniers participants du groupe en anti-phase au pré-test sur l'amplitude de cible de 25 cm (participant 3, 6, 7 dans le Tableau 3.1.) ne présentent pas de modification du patron de coordination spontané à l'issue de l'apprentissage de 90° ( $F_s(1, 40) < 2.52$ , *ns*). Les moyennes des phases relatives pour ce groupe de 3 participants sont de 177.46° au pré-test ( $ET\phi_{rel} = 16.50^\circ$ ), 174.11° lors du post-test ( $ET\phi_{rel} = 10.10^\circ$ ) et 180.73° lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 7.63^\circ$ ).

Parmi les 3 participants qui présentaient une coordination en phase au pré-test pour l'amplitude de cible de 25 cm, 2 (participants 1 et 5 dans le Tableau 3.1.) présentent une modification de la phase relative en direction du patron appris entre le pré-test et le post-test ( $F_s(1, 40) > 6.21$ ,  $p < .05$ ) et conservent la phase relative produite lors du post-test pour le test de rétention ( $F_s(1, 40) < 2.04$ , *ns*). Les valeurs de phase relative moyennées sur ces 2 participants sont de 46.90° lors du pré-test ( $ET\phi_{rel} = 34.74^\circ$ ), 90.83° lors du post-test ( $ET\phi_{rel} = 20.93^\circ$ ), et 97.29° lors du test de rétention ( $ET\phi_{rel} = 25.41^\circ$ ). Le troisième participant présente une différence entre le pré-test ( $\phi_{rel} = 39.83^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 23.72^\circ$ ) et le post-test ( $\phi_{rel} = 1.61^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 20.07^\circ$ ),  $F(1, 40) = 14.77$ ,  $p < .05$ , mais dans le sens inattendu d'un rapprochement vers une pure phase hanche-cheville (0°). La phase relative produite n'est pas différente entre le post-test et le test de rétention ( $\phi_{rel} = -2.07^\circ$  ;  $ET\phi_{rel} = 42.37^\circ$ ),  $F(1, 40) < 1$ , *ns*, mais son écart-type présente une augmentation significative,  $F(1, 4) = 15.60$ ,  $p < .05$ .

Ces résultats mettent en évidence que l'apprentissage de 90° a pour conséquence de modifier la phase relative spontanée de façon durable pour une majorité de participants, mais que de larges différences interindividuelles sont observées.

### 3.3.3.3.2. Evolution de la performance sur les patrons requis (balayage)

Contrairement aux résultats obtenus pour le patron de coordination spontané (tâche de poursuite de cible), les résultats individuels sur la tâche de balayage sont assez unifiés. Des tests de Watson-Williams sont menés par participant pour chaque patron requis lors du balayage, afin de comparer l'erreur absolue produite avant (pré-test) et après



l'apprentissage de 90° (post-test ou test de rétention). Pour 11 patrons requis sur les 12 testés, au moins 8 participants (sur les 12) présentent un progrès significatif de la précision du patron produit ( $EA$ ) à la suite de l'apprentissage de 90°,  $F_s(1, 40) > 4.29, p < .05$ . Le seul patron pour lequel le rapport s'équilibre entre les participants présentant un progrès et ceux n'en présentant pas est la phase relative de 210°. Pour ce patron, 5 participants diminuent significativement  $EA$  entre le pré-test et au moins une des sessions post-pratique (post-test ou test de rétention),  $F_s(1, 40) > 4.32, p < .05$ , et 7 participants ne présentent pas de différence significative,  $F_s(1, 40) < 3.54, ns$ . D'autre part, tous les participants présentent un progrès significatif de la précision sur au moins 8 des 12 patrons testés ( $F_s(1, 40) > 4.29, p < .05$ ). Le fait que la grande majorité des participants adoptent un comportement comparable, rend pertinentes les analyses pour le groupe présentées ci-dessous.

L'évolution de la performance sur la tâche de balayage lors des trois sessions de test est représentée Figure 3.22. pour le groupe de 12 participants. Nous pouvons constater un progrès inattendu de la précision et de la stabilité pour l'ensemble des patrons requis. L'attraction vers le patron en anti-phase observée lors du pré-test a tendance à disparaître lors du post-test avec une performance qui s'homogénéise entre les différents patrons. Il est intéressant de souligner que malgré l'arrêt de la pratique, on observe encore une amélioration de la performance lors du test de rétention. Des ANOVAs Patron (12 phases relatives exigées)  $\times$  Test (pré-test, post-test et test de rétention) avec mesures répétées sont menées sur les indices de performances ( $EC$  et  $EA, ET\phi_{rel}$ ). Pour  $EC$ , on observe un effet principal du Patron,  $F(11, 121) = 15.57, p < .05$ , mais pas d'effet du Test,  $F(2, 22) = 2.56, ns$ , ni d'effet d'interaction Patron  $\times$  Test,  $F(22, 242) = 1.50, ns$ . Ces résultats indiquent que la tendance à surestimer les valeurs de phase relative les plus basses et à sous-estimer les valeurs de phase relative les plus hautes perdure au cours des sessions de test. Pour  $EA$ , l'ANOVA révèle un effet principal du Patron,  $F(11, 121) = 14.84, p < .05$ , du Test,  $F(2, 22) = 52.26, p < 0.05$ , ainsi qu'un effet d'interaction Patron  $\times$  Test,  $F(22, 242) = 2.36, p < .05$ . De la même façon, pour  $ET\phi_{rel}$ , l'ANOVA montre un effet principal du Patron,  $F(11, 121) = 11.99, p < .05$ , du Test,  $F(2, 22) = 106.90, p < 0.05$  et une interaction significative Patron  $\times$  Test,  $F(22, 242) = 1.75, p < .05$ .

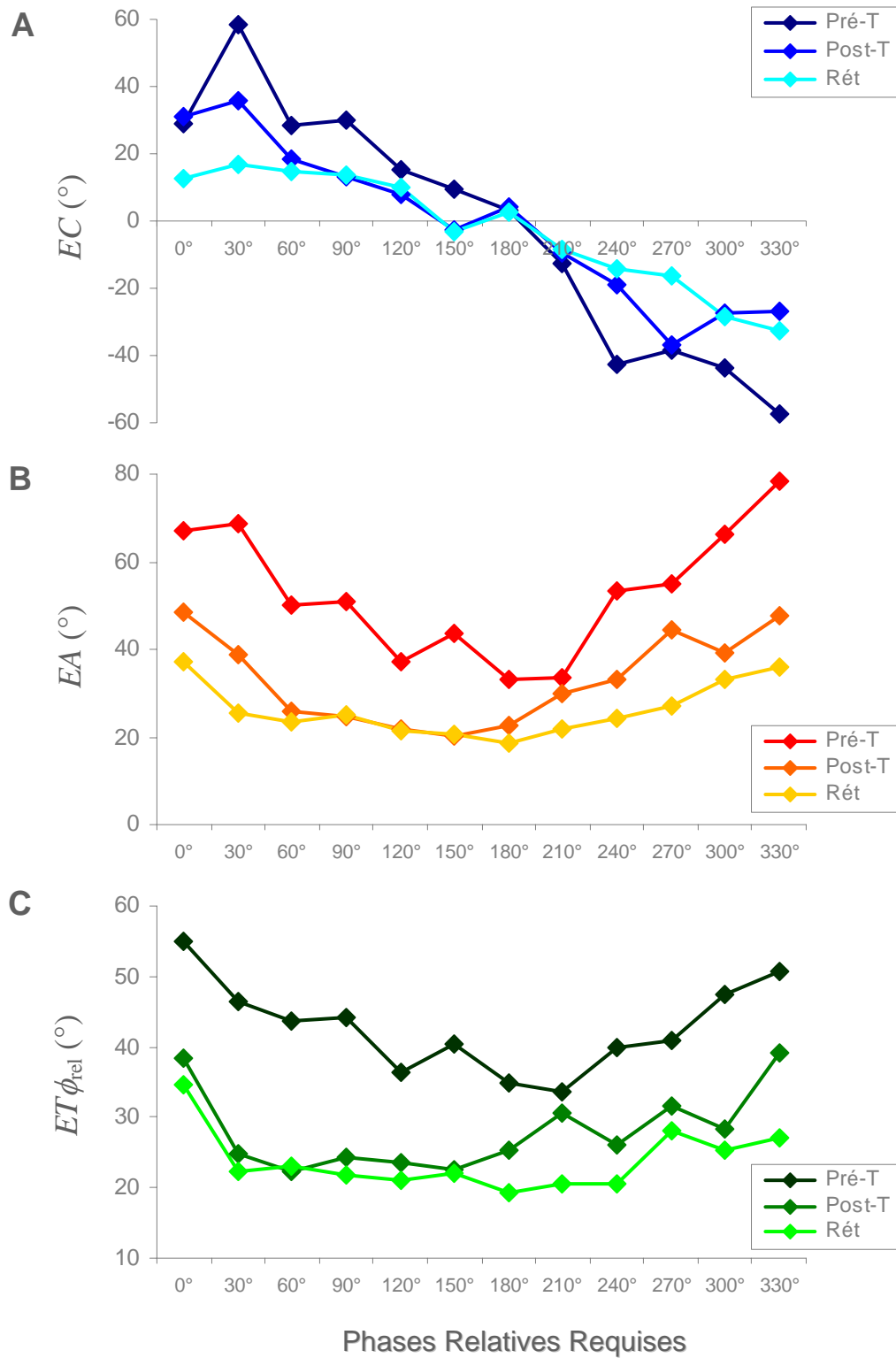


Figure 3.22. Evolution de la performance des 12 patrons de coordination requis au cours des sessions de test : pré-test (Pré-T), post-test (Post-T) et test de rétention (Rét). A : Erreur constante (EC). B : Erreur absolue (EA). C : Ecart-type de la phase relative ( $ET\phi_{rel}$ ).

Ces analyses nous permettent d'aboutir à trois conclusions. Tout d'abord, il existe une performance différente selon les patrons de phase relative requis : certaines coordinations sont mieux réalisées que d'autres. Deuxièmement, la performance de l'ensemble des patrons s'améliore entre le pré-test, le post-test et la rétention. Autrement dit, l'apprentissage de la phase relative de  $90^\circ$  mène à un progrès de l'ensemble des coordinations hanche-cheville. Pour finir, les effets d'interaction observés pour  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$  montrent que les différences de performance observées entre les patrons tendent à diminuer au cours des sessions de test. L'apprentissage de  $90^\circ$  amène une uniformisation de la performance entre les différentes coordinations.

Afin d'analyser si le patron de  $180^\circ$  est produit de façon significativement plus précise que les autres patrons, nous réalisons des analyses post-hoc de Newman-Keuls comparant l'erreur absolue sur les différents patrons requis pour chaque session de test. Ces analyses révèlent que lors du pré-test, l'erreur absolue est significativement plus faible pour  $180^\circ$  que pour les patrons de  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$  et  $330^\circ$  ( $p < .05$ ). Lors du post-test, la précision de  $180^\circ$  est plus importante que celle des patrons de  $0^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $300^\circ$  et  $330^\circ$  uniquement. Lors du test de rétention,  $180^\circ$  ne diffère plus significativement que de  $0^\circ$ .  $0^\circ$  et  $180^\circ$  sont d'ailleurs les seuls patrons à être significativement différents lors du test de rétention, tous les autres étant produits avec une précision qui ne diffère pas de façon significative ( $p > .10$ ). Ces résultats montrent qu'au cours des sessions de test, la précision de  $180^\circ$  perd de sa supériorité par rapport aux autres patrons de coordination requis.

#### **3.3.3.3.3. Effet de l'ordre de passation des patrons lors du balayage**

Le balayage testait 12 patrons  $\times$  3 essais de 8 cycles soit 288 cycles. Malgré la randomisation de l'ordre de passation des différents patrons, nous pouvons nous demander s'il existe un effet de cet ordre sur la performance des coordinations produites. En effet, les résultats obtenus sur le test de balayage montrent un progrès des différents indices de performance ( $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ ) pour l'ensemble des patrons testés entre le pré-test, le post-test et le test de rétention. S'il existe un effet d'ordre sur la performance des différentes coordinations (i.e., si les patrons testés en premier sont moins bien réalisés que ceux testés en fin de balayage), nous pourrions supposer que le progrès sur l'ensemble des modes hanche-cheville entre le pré-test et le post-test est dû à une meilleure maîtrise du dispositif expérimental (mise en relation entre le mouvement produit et sa conséquence sur la figure

de Lissajous). Par contre, l'absence d'effet d'ordre indiquerait plutôt que ce progrès général est dû à l'apprentissage du patron de 90°.

Des ANOVAs Rang (patrons n°1 à 12) × Test (pré-test, post-test, et test de rétention) avec mesures répétées sont menées sur  $EC$ ,  $EA$  et  $ET\phi_{rel}$ . Aucun de ces trois indices de performance ne présente d'effet significatif de l'ordre de passation des patrons. Pour  $EC$ , l'ANOVA ne révèle pas d'effet du Rang,  $F(11, 121) < 1$ , *ns*, du Test,  $F(2, 22) = 2.56$ , *ns*, ni de l'interaction Rang × Test,  $F(22, 242) < 1$ , *ns*. Pour  $EA$ , l'ANOVA révèle un effet principal du Test,  $F(2, 22) = 52.26$ ,  $p < .05$ , mais pas d'effet du Rang,  $F(11, 121) = 1.17$ , *ns*, ni d'interaction Rang × Test,  $F(22, 242) < 1$ , *ns*. De la même façon, pour  $ET\phi_{rel}$ , l'ANOVA révèle un effet principal du Test,  $F(2, 22) = 106.90$ ,  $p < .05$ , mais pas d'effet du Rang,  $F(11, 121) = 1.47$ , *ns*, ou d'interaction Rang × Test,  $F(22, 242) = 1.14$ , *ns*. Ces résultats suggèrent que le progrès observé entre le pré-test et les sessions postérieures à la pratique de 90° (post-test et test de rétention) ne sont pas dues à une meilleure maîtrise du dispositif expérimental, mais bel et bien à l'apprentissage de 90°.

#### 3.3.3.4. Amplitude de la tête lors de la tâche de poursuite de cible

Le gain tête/cible (i.e., rapport amplitude tête / amplitude cible) est représenté Figure 3.23. pour les deux amplitudes de cible (8 cm et 25 cm) et les trois sessions de test. Une ANOVA 2 (amplitude de cible) × 3 (session de test) avec mesures répétées est effectuée sur le gain tête/cible. L'analyse montre un effet principal de l'amplitude de la cible,  $F(1, 11) = 242.66$ ,  $p < .05$ , mais pas d'effet de la session de test,  $F(2, 22) = 3.05$ , *ns*, ni d'interaction,  $F(2, 22) < 1$ , *ns*. Le gain moyen sur l'ensemble des sessions de test est de 2.39 lorsque l'amplitude de cible est de 8 cm, et de 1.20 lorsqu'elle est de 25 cm. Les participants respectent donc relativement bien l'amplitude de la cible lorsqu'elle est de 25 cm (gain proche de 1), alors qu'ils effectuent une amplitude de tête plus de deux fois supérieure à celle demandée lorsque l'amplitude de cible est de 8 cm. Le fait que le gain tête/cible soit plus important pour de petites amplitudes de cible que pour de grandes amplitudes avait déjà été observé par Bardy et al. (e.g., 1999).



Figure 3.23. Gain tête / cible pour les deux amplitudes de cible (8 cm et 25 cm) lors des trois sessions de test sur la tâche de poursuite de cible : pré-test, post-test, et test de rétention (Rét).

#### 3.3.4. Discussion

L'expérimentation 5 avait pour but d'observer à la fois les conséquences de l'apprentissage sur les patrons de coordination spontanés et sur un grand nombre de patrons requis par information comportementale. Nous nous attendions à observer une certaine concordance entre les résultats obtenus. Pourtant, comme le laissait présager la confrontation des résultats des expérimentations 1, 2 et 4, l'expérimentation 5 montre qu'il est difficile d'établir un lien entre la performance des différents patrons requis et le patron qui émerge spontanément lors de la réalisation de la tâche supra-posturale. Comme pour les expérimentations 1 et 2, nous observons une modification du patron spontané en direction du mode appris pour la majorité des participants. A partir des résultats expérimentaux observés pour le système bi-manuel (e.g., Zanone & Kelso, 1992a) nous pouvions supposer que cette modification se traduirait par l'apparition d'un nouveau bassin d'attraction dans le diagramme de phase, avec une perte de stabilité des patrons intrinsèques initiaux. Or, le balayage a révélé que la session de pratique de 90° permettait une amélioration générale de la performance pour tous les patrons de coordination requis. Cette amélioration aboutit à une uniformisation de la performance des modes hanche-cheville : à l'issue de l'apprentissage, aucun patron n'est produit avec une performance supérieure aux autres. Dans un premier temps, nous discutons du contraste considérable

entre nos résultats et ceux obtenus dans les expérimentations bi-manuelles. Dans un deuxième temps, nous essayerons d'évaluer l'importance que peut avoir la nature de la tâche sur la dynamique de coordination.

*Evolution de la dynamique de coordination posturale.*

Avant que l'apprentissage du patron de  $90^\circ$  ait lieu, le balayage révèle déjà des différences par rapport à ce qui pouvait être attendu à partir des modes spontanés. Le premier résultat important observé lors du balayage est l'absence de patron en phase stable lorsqu'il est requis par la figure de Lissajous. Ce résultat, déjà observé dans les expérimentations 3 et 4, est le premier point qui distingue les dynamiques de coordination requise et spontanée. Le balayage révèle, d'autre part, que certains participants réussissent à produire de façon relativement performante d'autres patrons de coordination que les modes intrinsèques. C'est un résultat que nous n'attendions pas étant donné que seules la phase et l'anti-phase émergent lorsqu'il n'y a pas d'exigence spécifique. Nous avons proposé précédemment que la nature de la tâche puisse être à l'origine de la différence entre patrons spontanés et patrons requis (expérimentation 3). Nous pousserons plus avant notre réflexion sur ce point dans la deuxième partie de la discussion (*Nature de la tâche*).

Concernant les conséquences de l'apprentissage, les résultats obtenus par Zanone et Kelso (1992a, 1997 ; Kelso & Zanone, 2002) lors du balayage des coordinations bi-manuelles ne laissent pas présager les progrès que nous avons observés pour l'ensemble des patrons requis. Dans leurs expérimentations, Zanone et Kelso effectuent un balayage avant et après la pratique d'un nouveau mode de coordination, afin de tester la performance sur différentes relations de phase bi-manuelles. Avant apprentissage, les modes en phase et en anti-phase sont les plus précis et les plus stables de tous les patrons testés. Par contre, après apprentissage, le mode appris peut lui aussi être produit de façon performante, et le mode en anti-phase est déstabilisé. Ainsi, même lorsque le participant a pour instruction de produire une phase relative de  $180^\circ$  (patron intrinsèque initial), il ne parvient pas à l'exécuter de façon aussi précise et stable qu'avant la pratique du nouveau mode. D'autres études sur les coordinations bi-manuelles, qui investigaient les effets de l'apprentissage uniquement sur les patrons intrinsèques (i.e., sans faire de balayage), se sont opposées à ces résultats (e.g., Fontaine et al., 1997 ; Lee et al, 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Swinnen et al., 1997). Néanmoins, même lorsque la déstabilisation des patrons préexistants

est absente ou passagère, aucune amélioration de la performance n'est constatée. Deux hypothèses non exclusives peuvent permettre d'appréhender, d'une part, la différence de résultats obtenus pour les expérimentations sur le système bi-manuel et nos expérimentations 4 et 5 (amélioration de l'ensemble des coordinations testées, patrons intrinsèques compris), et, d'autre part, nos divergences de résultats entre patrons posturaux spontanés (expérimentations 1, 2 et 5) et requis (expérimentations 4 et 5).

Premièrement, l'information comportementale utilisée peut être une cause des différences observées. Pour les expérimentations sur les coordinations bi-manuelles, les patrons intrinsèques ne sont jamais testés en présence de feedback augmenté. Lorsque les expérimentations testent uniquement les patrons intrinsèques, des explications et/ou démonstrations sur le mode attendu sont fournies aux participants (Amazeen, 2002 ; Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997). Lorsqu'un balayage de l'ensemble du diagramme de phase bi-manuel est réalisé, la phase relative à produire est spécifiée grâce à un métronome visuel (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997). Dans les expérimentations 4 et 5, le dispositif que nous avons utilisé pour spécifier les patrons hanche-cheville à produire correspond à un feedback augmenté relativement puissant. Durant tout l'essai, le participant peut réajuster les mouvements des hanches et des chevilles qu'il produit afin de les faire correspondre au modèle qui lui est présenté visuellement (figure de Lissajous). L'amélioration de tous les modes de coordination que nous avons observé peut correspondre à un apprentissage de la maîtrise du dispositif expérimental. Peut-être que lors de la pratique de 90°, les participants apprennent à associer les mouvements des hanches et des chevilles à leurs conséquences sur la figure de Lissajous de façon plus en plus précise. Cette hypothèse est tout à fait plausible malgré le quart d'heure de familiarisation sur le dispositif. Néanmoins, deux arguments vont à l'encontre de cette conclusion. D'une part, lors de l'expérimentation 4, nous avons constaté un taux de progrès différent pour les quatre patrons testés (20°, 90°, 180° et 270°). Or, si l'amélioration est due uniquement à une meilleure maîtrise du dispositif, elle devrait théoriquement influencer les différents patrons de façon équivalente. D'autre part, lors de l'expérimentation 5, nous n'avons pas observé d'effet de l'ordre de passation des patrons (présentés de façon randomisée) sur la performance. Pourtant, si les participants progressent au fur et à mesure qu'ils utilisent le dispositif, un effet bénéfique devrait déjà s'observer entre les premiers et les derniers patrons testés lors d'une session de balayage.

En effet, lors d'une seule session de balayage, les participants réalisent 36 essais (12 patrons  $\times$  3 essais) de 8 cycles, soit 288 cycles, ce qui représente un entraînement conséquent sur le dispositif (notamment par rapport aux 480 cycles de pratique sur le patron de 90°). Même s'il ne constitue pas une preuve directe, le fait que la performance ne s'améliore pas avec le rang de passation des patrons lors du balayage suggère que les résultats obtenus ne sont pas la conséquence d'un apprentissage de la maîtrise du dispositif expérimental.

Une deuxième hypothèse peut être avancée pour expliquer l'amélioration de l'ensemble des patrons de coordination : les participants apprendraient à mieux contrôler le mouvement de leurs articulations lors de la session d'apprentissage. Ainsi, la pratique de la phase relative hanche-cheville de 90° ne permettrait pas simplement un progrès du mode de coordination lui-même, mais aussi un meilleur contrôle des hanches et des chevilles en général, incluant le développement de la sensibilité aux informations perceptives. Selon cette hypothèse, la pratique de n'importe quel patron hanche-cheville aurait pour conséquence un meilleur contrôle du mouvement de ces articulations, ce qui permettrait une meilleure performance pour tout mode de coordination. Mais pourquoi, dans ce cas, serait-ce différent pour le système bi-manuel ? Sans doute ces deux systèmes effecteurs (hanche-cheville vs. bi-manuel) présentent-ils un degré initial de maîtrise différent. Il est plus que probable que la précision du contrôle du mouvement des membres supérieurs soit plus développée que celle des hanches et des chevilles. En effet, les bras et les mains sont fréquemment utilisés dans les tâches de la vie quotidienne, notamment pour produire des gestes nécessitant une précision extrême (attraper un objet, lacer des chaussures, jouer d'un instrument, jongler, dactylographier...). Par contre, le système postural est plus rarement sollicité du point de vue du changement des buts d'action, ou même tout simplement de la réalisation précise d'une coordination : les buts des tâches posturales rencontrées dans la vie quotidienne sont exclusivement supra-posturaux. Peut-être que le fait d'apprendre à coordonner les hanches et les chevilles permet d'apprendre à contrôler de façon fine les mouvements de ces articulations, comme on apprend à contrôler les mouvements maladroits d'une main gauche : plus le système effecteur est sollicité, et quelque soit le type de mouvement impliqué, plus le contrôle moteur devient fin et peut s'appliquer à tout type de mouvement. Bernstein (1967) parle de gel des degrés de liberté au début de l'apprentissage. Il est possible que pour un apprentissage tout à fait inhabituel, c'est-à-dire



pour des articulations rarement impliquées du point de vue de coordinations articulaires précises, une première étape de la pratique mène à un meilleur contrôle des degrés de liberté, quelque soit le patron de coordination pratiqué. Ainsi, les différences observées entre le système postural et le système bi-manuel pourraient correspondre à des étapes différentes du contrôle des degrés de liberté.

*Nature de la tâche.*

Dans la citation que nous avons présenté en introduction de l'expérimentation 5, Hodges et Franks (2002) utilisent le terme d'*habileté fermée* lorsque le but de la tâche est la coordination elle-même. A l'origine (Gentile, 1972), ce terme permettait plutôt de distinguer les habiletés se déroulant dans un contexte environnemental prédictible des habiletés réalisées dans un environnement imprédictible, i.e., auquel il faut s'adapter (*habiletés ouvertes*). Si on voulait leur attribuer une classification utilisée dans la littérature, la nature de nos tâches posturales serait mieux définie par les termes de morphocinèse et de topocinèse. Cette classification différencie les habiletés pour lesquelles le but du mouvement est de produire une forme spécifique (morphocinèse) et les habiletés pour lesquelles le mouvement est dirigé vers un but spatial (topocinèse). Les classifications sont néanmoins à employer avec prudence car leur caractère dichotomique les rend réductrices.

De façon plus générale, nous pouvons dire que l'intention des participants est différente pour la tâche de poursuite de cible et la tâche avec la figure de Lissajous. Les études ayant investigué le rôle de l'intention sur les coordinations motrices (e.g., Hodges & Franks, 2002 ; Hodges & Lee, 1999 ; Wulf & Prinz, 2001 ; voir Lee, 2004, pour une revue) ont révélé que son influence était prépondérante sur la performance et l'apprentissage de patrons de coordination. La tâche supra-posturale de poursuite de cible que nous avons utilisée, possède la caractéristique (assez rare dans le domaine de la coordination inter-segmentaire) de tester un patron de coordination avec une intention du participant qui n'a aucun lien avec ce patron. L'expérimentation 5 a notamment mis au jour que les conséquences de l'apprentissage du patron de 90° présentent de fortes différences individuelles pour les modes spontanés, alors les participants adoptent un comportement unifié lorsque les coordinations sont requises (balayage). Les résultats montrent, de surcroît, que les patrons de coordination spontanés ne présentent pas de lien apparent avec

les caractéristiques du diagramme de phase testé au même moment. Ces résultats laissent penser que le rôle de l'intention est bien souvent sous-estimé dans l'approche dynamique de la motricité, et que les observations réalisées sur un certain type de tâche ne sont pas directement généralisables à d'autres, même si la coordination inter-segmentaire impliquée est similaire.

# CHAPITRE 4

---

---

## Discussion Générale

L'objectif principal de ce travail doctoral était de comprendre les interactions entre les coordinations initiales et les coordinations apprises sous l'angle du système postural. Par rapport aux études menées jusqu'alors sur cette question, notre point de vue présente deux particularités majeures. Tout d'abord, le système hanche-cheville que nous avons choisi d'étudier possède des spécificités qui permettent d'étudier le problème de l'apprentissage moteur en dépassant le cadre quasi exclusif des coordinations bi-manuelles. Ensuite, la tâche supra-posturale nous a offert la possibilité d'élargir l'étude des conséquences du processus d'apprentissage à des coordinations qui ne sont pas requises par le but de la tâche.

Lors des différentes expérimentations<sup>9</sup> que nous avons menées, des paramètres expérimentaux variés ont été utilisés. Par exemple, concernant la tâche supra-posturale, nous avons testé les participants avec une fréquence d'oscillation de la cible choisie de façon individuelle (expérimentation 1), ou au contraire, identique pour tous (expérimentations 2 et 5). La seule conséquence de cette différence est de réduire le nombre de participants exclus<sup>10</sup> dans le cas où la fréquence d'oscillation préférée est sélectionnée (i.e., la fréquence pour laquelle la coordination hanche-cheville est la plus stable). Lors de l'expérimentation 5, nous imposons la même fréquence de cible pour tous les participants, mais nous augmentons le nombre de répétitions afin de sélectionner les essais les plus stables. Nous avons ainsi pu garder l'ensemble du groupe pour la suite de l'étude. Toujours pour la tâche supra-posturale, nous avons cherché à investiguer les deux patrons intrinsèques initiaux : la phase et l'anti-phase. Pour cela, nous avons varié soit la fréquence d'oscillation de la cible (expérimentation 2), soit son amplitude (expérimentation 5). Les petites vs. grandes valeurs de ces paramètres de contrôle favorisent l'émergence de l'un ou l'autre patron intrinsèque. Les patrons escomptés sont apparus de façon plus dichotomique dans le cas de l'utilisation de deux fréquences plutôt que de deux amplitudes. D'autre part, une variété primordiale de nos protocoles a été d'étudier l'influence de l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination sur les patrons spontanés initiaux

---

<sup>9</sup> L'expérimentation 3 dispose d'un statut particulier car elle n'étudie pas la question de l'apprentissage. Elle constitue une étape préalable qui nous a permis de tester la dynamique de coordination posturale sous l'influence d'une information comportementale.

<sup>10</sup> Les participants présentant une coordination hanche-cheville initiale non directionnelle, c'est-à-dire distribuée de façon uniforme sur l'ensemble des phases relatives possibles, étaient exclus des analyses.

(utilisation de la tâche supra-posturale dans les expérimentations 1, 2 et 5), ainsi que sur des coordinations requises par information comportementale (utilisation du dispositif avec la figure de Lissajous dans les expérimentations 4 et 5). L'ampleur des différences observées entre ces deux types de tâche fut plus que manifeste. Concernant le patron de coordination appris, la phase relative hanche-cheville correspond à  $135^\circ$  pour les expérimentations 1 et 2, et à  $90^\circ$  pour les expérimentations 4 et 5. Ces deux patrons ont été choisis sur la base de leur caractère non spontané : ils n'avaient jamais émergé de la réalisation de la tâche supra-posturale. Les conséquences de l'apprentissage de ces deux patrons sur les coordinations spontanées se sont révélées similaires. Par contre, en dépit de la pratique, le patron de  $90^\circ$  est particulièrement difficile à atteindre de façon précise, et reste surestimé. L'ensemble des résultats obtenus à partir de ces différentes conditions expérimentales permet d'apporter des éléments de réponse aux prédictions de la théorie dynamique de l'apprentissage moteur. Nous analysons ci-après les implications apportées par nos résultats quant aux prédictions théoriques énoncées dans le premier chapitre de ce travail.

#### **4.1. Evolution des caractéristiques du patron produit durant l'apprentissage**

##### - Attraction vers les patrons préférés au début de l'apprentissage

La théorie suppose que lorsqu'un nouveau patron de coordination est appris, le système est attiré vers les modes intrinsèques dans les premiers temps de la pratique. Comme pour les expérimentations menées sur le système bi-manuel (e.g., Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997 ; Zanone & Kelso, 1992a), nous avons effectivement observé une tendance à produire de façon préférentielle le mode spontané en anti-phase au début de la pratique de la nouvelle coordination (expérimentation 1). L'attractivité du patron intrinsèque est ensuite surmontée de façon à atteindre et à stabiliser l'exécution du mode requis.

##### - Itinéraires d'apprentissage

Pour toutes les sessions d'apprentissage (expérimentations 1, 2, 4 et 5), la performance du patron de coordination à apprendre s'améliore avec la quantité de pratique. Les groupes de participants progressent du point de vue de la précision (diminution de

l'erreur) et de la stabilité (diminution de la variabilité) du patron produit. Ce résultat est similaire à ceux obtenus dans les expérimentations sur les coordinations bi-manuelles (e.g., Amazeen, 2002 ; Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997). De plus, des différences individuelles ont été mises en évidence au niveau de l'amélioration de la performance du patron hanche-cheville à apprendre. Entre le début et la fin des sessions de pratique, quatre types d'évolution peuvent être identifiés (expérimentations 1, 2 et 5). Dans le premier cas, les participants produisent une coordination stable, mais éloignée du patron à apprendre au début de la pratique. L'apprentissage leur permet d'atteindre progressivement le patron requis tout en conservant leur stabilité initiale. Dans le deuxième cas, les phases relatives produites sont orientées vers le patron requis dès les premiers essais, mais présentent une grande variabilité. Les progrès consistent alors en une stabilisation de la coordination produite. Dans le troisième cas, une faible performance initiale est constatée à la fois pour la précision et la stabilité. La session d'apprentissage permet d'améliorer ces deux paramètres de façon simultanée. Dans le dernier cas, certains participants réussissent à exécuter le patron requis dès le début de la pratique, et ne présentent pas de variation significative avec l'augmentation du nombre d'essais. Ces différences révèlent que plusieurs itinéraires peuvent être empruntés afin d'atteindre une même performance à l'issue de la session d'apprentissage.

La prédiction théorique selon laquelle l'acquisition d'un nouveau mode peut entraîner la création d'un nouvel attracteur (changement brusque de la dynamique de coordination) ou le déplacement d'un attracteur préexistant (changement continu de la dynamique de coordination) n'a pas été investiguée dans nos expérimentations. Le balayage du diagramme de phase réalisé lors de l'expérimentation 5 aurait pu permettre d'étudier cette question, mais les résultats inattendus que nous avons obtenus ne présentent aucune correspondance avec l'apparition d'un bassin d'attraction (qu'il soit créé ou déplacé) au niveau du mode appris.

## **4.2. De quoi dépend la facilité à apprendre ?**

Deux hypothèses sont relatives à cette question. Premièrement, la performance et le taux d'apprentissage varieraient de façon inverse à la stabilité de l'attracteur intrinsèque le

plus proche du patron exigé. Les expérimentations ayant examiné cette question à partir des coordinations bi-manuelles (Fontaine et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002) avaient réfuté cette prédiction en comparant l'apprentissage de phases relatives proches de la phase (attracteur bi-manuel le plus stable) et proches de l'anti-phase (attracteur bi-manuel le moins stable). Dans notre expérimentation 1, nous avons testé cette hypothèse d'une façon différente. Nous avons évalué si la facilité à produire (performance au début de la session de pratique) et à apprendre (performance à la fin de la session de pratique) le patron hanche-cheville de  $135^\circ$  était corrélée à la stabilité initiale individuelle du patron spontané en anti-phase. Comme les expérimentations bi-manuelles précitées (Fontaine et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002), nos résultats s'opposent à la prédiction théorique : la performance sur la tâche d'apprentissage n'est pas liée à la stabilité initiale du patron intrinsèque le plus proche.

La deuxième hypothèse stipule que plus la distance entre l'attracteur intrinsèque le plus proche et le patron à apprendre est grande, plus le phénomène de compétition est important. Ainsi, une phase relative proche d'un attracteur existant serait plus facilement apprise qu'une phase relative éloignée. Les expérimentations sur les coordinations bi-manuelles ont révélé des résultats contraires à cette prédiction : la performance à la fin de la pratique ainsi que la vitesse du processus d'apprentissage ne dépendent pas de la distance du patron à apprendre par rapport à l'attracteur le plus proche (Amazeen, 2002 ; Kostrubiec & Zanone, 2002 ; Wenderoth et al., 2002). Nous n'avons pas examiné cette question pour le système hanche-cheville. L'apprentissage de  $135^\circ$  dans les expérimentations 1 et 2, ou de  $90^\circ$  dans les expérimentations 4 et 5 se fait dans des conditions de réalisation différentes (feedback augmenté terminal tous les trois essais vs. feedback augmenté en temps réel), ce qui proscrit leur comparaison. Le fait que la phase relative hanche-cheville de  $90^\circ$  reste surestimée à l'issue de la pratique (expérimentations 4 et 5) indique que ce mode est particulièrement difficile à produire et à apprendre. Dans le cadre de la posture, il est probable que cette difficulté ne soit pas en rapport avec la distance entre le patron à apprendre et le patron intrinsèque. Le mode de coordination hanche-cheville de  $90^\circ$  est celui (avec son symétrique de  $270^\circ$ ) qui nécessite d'approcher les limites de stabilité de l'équilibre érigé durant la proportion de cycle la plus importante. Nous pensons que c'est cette caractéristique qui en fait un patron particulièrement difficile à apprendre.

### 4.3. Evolution de la dynamique intrinsèque et déstabilisation des attracteurs initiaux

Selon l'approche dynamique de l'apprentissage moteur, l'acquisition d'un nouveau mode de coordination provoque la modification de l'ensemble de la disposition des attracteurs et peut s'accompagner de la déstabilisation d'un des patrons préexistants. Les résultats obtenus précédemment sur les coordinations bi-manuelles divergent. Certaines études aboutissent à la conclusion d'une déstabilisation du patron en anti-phase avec l'apprentissage d'un nouveau mode (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997) et d'autres affirment que cette déstabilisation n'a pas lieu (Swinnen et al., 1997) ou qu'elle est temporaire (Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Smethurst & Carson, 2001). Dans les expérimentations 1, 2, 4 et 5, nous avons examiné cette question dans le cadre des coordinations hanche-cheville. L'accord des résultats avec la prédiction théorique dépend complètement de la tâche considérée.

#### *Coordinations spontanées.*

En ce qui concerne les coordinations spontanées (expérimentations 1, 2 et 5), nos résultats s'accordent parfaitement avec les prédictions théoriques. Rappelons que les coordinations spontanées émergent de la réalisation de la tâche supra-posturale (poursuite des mouvements antéropostérieurs d'une cible avec la tête). En théorie, cette tâche peut être accomplie à partir de n'importe quel patron hanche-cheville. La notion d'équivalence motrice, selon laquelle plusieurs patrons de mouvement peuvent permettre de répondre aux demandes de la tâche, n'exclut pas le fait que certains modes soient préférés à d'autres. Avant qu'une phase relative hanche-cheville non spontanée ne soit pratiquée, deux patrons de coordination sont observés de façon systématique : la phase et l'anti-phase. En 1994, Zanone et Kelso soulignent que "la prédiction théorique fondamentale annonçant que le patron appris devient une part constitutive de la dynamique de coordination doit recevoir une évaluation rigoureuse. Cela implique qu'avec la pratique, le patron appris devient un état attractif de la dynamique *en l'absence* d'exigence spécifique de la tâche. Autrement dit, si on examine les tendances de coordination spontanées après apprentissage, le patron nouvellement appris devrait appartenir à la dynamique intrinsèque" (Zanone & Kelso, 1994, p. 484). Cette proposition n'a pas été investiguée pour le système bi-manuel, faute de tâche permettant de tester l'émergence de patrons de coordination sans les exiger. En instaurant un but autre que la coordination elle-même pour les participants, la tâche supra-



posturale de poursuite de cible nous a permis d'évaluer les conséquences de l'acquisition d'un nouveau mode de coordination sur les patrons posturaux spontanés (expérimentations 1, 2 et 5). Les résultats obtenus reflètent bien la description de Zanone et Kelso (1994) précitée : en conséquence de la pratique, la majorité des participants présente une modification des patrons intrinsèques initiaux, en phase et en anti-phase, en direction du patron appris. Autrement dit, le patron appris se substitue aux modes intrinsèques initiaux, et ce, sans qu'aucune exigence spécifique à la coordination ne soit formulée.

Derrière cette tendance générale, il est important de souligner que de larges différences individuelles ont été constatées. Sur l'ensemble des 35 participants ayant appris la nouvelle coordination (expérimentations 1, 2 et 5), quatre modifications du patron spontané peuvent être distinguées. La première correspond au changement en direction du patron appris que nous venons de décrire. Elle concerne la majorité des participants. En fonction des individus, le patron spontané peut atteindre une valeur proche de la phase relative apprise, ou alors se situer de façon intermédiaire entre un mode intrinsèque et le mode appris. Dans un deuxième cas, la stabilité du patron intrinsèque initial diminue, sans que la phase relative moyenne produite soit modifiée. Ce cas n'est observé à l'état final que lors de l'expérimentation 1 (4 participants), sans doute en raison du nombre de cycles de pratique moindre (300) que pour les expérimentations 2 et 5 (500 et 480, respectivement). Le troisième type de modification se fait en direction du patron symétrique au patron appris. Il ne concerne que 3 participants. Pour finir, les 25% de participants restant ne présentent pas de modification du patron spontané à la suite de la pratique du nouveau mode, que ce soit sur la phase relative moyenne produite ou sur sa stabilité.

#### *Coordinations requises.*

Concernant les coordinations requises par information comportementale (expérimentations 4 et 5), l'apprentissage d'un nouveau patron hanche-cheville a entraîné des conséquences imprévues. En effet, qu'il s'agisse des résultats obtenus sur les patrons posturaux spontanés (expérimentations 1, 2 et 5), ou sur les coordinations bi-manuelles (e.g., Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Swinnen et al., 1997 ; Zanone & Kelso, 1992a, 1997), rien ne laissait présager les conséquences de l'apprentissage que nous avons observées. Dans les expérimentations 4 et 5, plusieurs patrons de coordination sont testés à différents moments du processus d'apprentissage de la phase relative de 90°. Ces patrons

sont requis par l'intermédiaire d'un feedback augmenté sous forme d'une figure de Lissajous. Contrairement à ce qui était attendu, le patron en phase observé de façon systématique avec l'anti-phase lors de la tâche supra-posturale, n'est pas apparu plus performant que les autres lors des investigations initiales (expérimentations 3, 4 et 5). Avant la pratique, seul le mode requis en anti-phase apparaît comme attracteur de la dynamique de coordination. Concernant les conséquences de l'apprentissage, les résultats montrent que la pratique d'une phase relative de  $90^\circ$  permet une amélioration significative de la performance pour toutes les autres phases relatives testées ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$  pour l'expérimentation 4 ; 12 phases relatives comprises entre  $0^\circ$  et  $330^\circ$  et espacées d'un intervalle de  $30^\circ$  pour l'expérimentation 5). Contrairement aux résultats obtenus sur les coordinations spontanées, les comportements individuels sont unifiés. Ainsi, pour l'expérimentation 5, tous les participants présentent cette amélioration sur au moins huit des douze patrons testés.

Ces observations sont différentes de ce qui avait été constaté jusqu'alors sur les conséquences de l'apprentissage. Premièrement, l'évolution de la dynamique de coordination identifiée lors des sessions de balayage (expérimentation 5) ne reflète pas la modification du patron spontané en direction du patron appris (expérimentations 1, 2 et 5). Deuxièmement, les résultats obtenus lorsque les patrons hanche-cheville sont requis ne concordent pas avec la déstabilisation des patrons intrinsèques observée par Zanone et Kelso (e.g., 1992a) sur les coordinations bi-manuelles. D'un autre côté, ils ne s'accordent pas non plus avec les travaux qui contredisaient les résultats obtenus par Zanone et Kelso (Fontaine et al., 1997 ; Lee et al., 1995 ; Smethurst & Carson, 2001 ; Swinnen et al., 1997) : même si la déstabilisation des patrons bi-manuels intrinsèques est absente ou temporaire, aucune amélioration n'a été constatée pour ces patrons. Nous avons émis deux propositions pour expliquer ces divergences. La différence entre les patrons hanche-cheville spontanés et requis peut être expliquée par l'influence de la nature de la tâche (intention du participant) sur la coordination (voir la discussion des expérimentations 3 et 5). D'autre part, la différence entre les coordinations posturales et les coordinations bi-manuelles peut correspondre à une différence du niveau de contrôle des degrés de liberté considérés (voir la discussion de l'expérimentation 5).

#### 4.4. Transfert d'apprentissage

##### - Transfert entre différentes coordinations

En balayant la dynamique de coordination bi-manuelle entre  $0^\circ$  et  $360^\circ$ , Zanone et Kelso (1997) ont observé un transfert positif entre le mode appris et son symétrique. Autrement dit, le patron bi-manuel apparaît être appris indépendamment de l'ordre entre les segments. Contrairement au système bi-manuel, le fait que le système hanche-cheville concerne des membres non-homologues implique que la dynamique de coordination est asymétrique : l'ordre entre les mouvements des deux articulations influence la performance de la coordination. Nous avons ainsi montré dans l'expérimentation 3 que les patrons menés par les chevilles étaient produits de façon significativement plus précise (erreur plus faible) que ceux menés par les hanches.

Un des objectifs de l'expérimentation 4 était d'étudier le transfert d'apprentissage vers le patron symétrique au mode appris dans le cadre de ce système hanche-cheville asymétrique. Les résultats ont révélé que la pratique d'une phase relative de  $90^\circ$  permettait un progrès de la performance du patron de  $270^\circ$ , symétrique au patron appris, mais également des modes de  $20^\circ$  et  $180^\circ$ . Les taux d'amélioration de la précision et de la stabilité sont significativement plus importants pour les patrons de  $90^\circ$  et de  $270^\circ$ , ce qui laisse penser que l'apprentissage de  $90^\circ$  influe plus sur  $270^\circ$  que sur les autres patrons. Néanmoins, le fait que les patrons de  $20^\circ$  et de  $180^\circ$  s'améliorent également interdit de conclure qu'un transfert positif entre le patron appris et son symétrique a lieu. Ces réserves sont confirmées lors de l'expérimentation 5, qui montre que l'apprentissage de  $90^\circ$  permet une amélioration de la performance pour les douze patrons de coordination testés. Cette amélioration mène à une uniformisation de la performance sur l'ensemble du diagramme de phase. Il semble difficile dans ces conditions, de parler de transfert entre modes de coordination. Dans la discussion de l'expérimentation 5, nous avons avancé l'idée que ce progrès général n'était pas dû à la pratique de la phase relative de  $90^\circ$  elle-même mais au développement d'un meilleur contrôle du mouvement des hanches et des chevilles. Il est probable que l'apprentissage de tout autre mode de coordination aurait eu les mêmes conséquences.

Concernant la tâche supra-posturale, nous avons observé une modification du patron hanche-cheville spontané en direction du patron symétrique au mode appris pour 3

participants sur les 24 testés lors des expérimentations 2 et 5. Ce résultat peut être rapproché de ceux obtenus pour les coordinations bi-manuelles mais sa portée pour le système postural est difficile à évaluer. En effet, d'une part, ce comportement est marginal, et d'autre part, il ne peut pas être expliqué par les expérimentations 4 et 5 testant les coordinations requises, puisque le patron symétrique au patron appris n'est pas le seul à s'améliorer.

- Transfert entre différents systèmes effecteurs

Cette question n'a pas été investiguée dans le cadre des coordinations hanche-cheville, mais pourrait constituer un objet intéressant pour de futures recherches. Kelso et Zanone (2002) ont déjà mis en évidence la présence d'un transfert positif entre deux systèmes de membres homologues (bras vs. jambes). Non seulement le mode appris avec un système effecteur s'améliore également pour le système effecteur non entraîné, mais de plus, les dynamiques de coordination des deux systèmes, identifiées grâce à des sessions de balayage, sont affectées de la même façon. Les auteurs (Kelso & Zanone, 2002 ; Zanone & Kelso, 1994) se demandent si un transfert similaire pourrait s'opérer entre un système symétrique et un système asymétrique. Pour cela, ils proposent d'étudier si l'apprentissage d'une coordination entre les deux bras peut se généraliser au système ipsi-latéral bras-jambe. Cette question pourrait également être investiguée par l'intermédiaire du système hanche-cheville. L'importance des spécificités du système postural (segments non homologues, articulations couplées, contraintes liées au maintien de l'équilibre...) permettrait d'évaluer le degré d'abstraction de la dynamique de coordination et de son transfert : à quel point ce qui est appris est-il indépendant des particularités du système impliqué lors de l'acquisition ?

- Transfert entre conditions de réalisation

De nombreuses études ont montré que l'apprentissage d'un patron de coordination bi-manuel se transférait lors de conditions de réalisation différentes de la pratique, comme la fréquence d'exécution (Amazeen, 2002 ; Lee et al., 1995) ou la richesse du feedback disponible (Swinnen et al., 1997 ; Wenderoth et al., 2002). La tâche supra-posturale nous a permis d'accentuer la différence entre la condition de pratique et la condition de transfert par rapport à ce qui avait été investigué jusqu'à présent. Les expérimentations 1 et 2 montrent que l'apprentissage du patron de 135°, sans poursuite de cible, et avec instruction

sur le mouvement à produire, permet son émergence lors de la tâche supra-posturale, i.e., lorsque le participant doit suivre les mouvements d'une cible avec la tête, et qu'il n'a aucune instruction sur la coordination hanche-cheville à adopter. Des résultats similaires sont obtenus dans l'expérimentation 5 avec l'apprentissage de 90°. L'étude de ce type de transfert est particulièrement importante dans le cadre des situations quotidiennes ou sportives, qui pour la plupart, ne requièrent pas de mode de coordination spécifique pour atteindre les buts d'action. Par exemple, dans le domaine sportif, on peut se demander dans quelle mesure la répétition d'une coordination spécifique au mouvement expert (e.g., tir en suspension) pourra s'appliquer dans une situation de compétition où le but dépassera le niveau de la coordination elle-même (e.g., marquer un panier).

Il est important de préciser que tous les résultats que nous avons obtenus à l'issue de la session d'apprentissage ont persisté une semaine après l'arrêt de la pratique pour la grande majorité de nos participants (expérimentations 2, 4 et 5). Des progrès de performance sont même encore observés entre la fin de la session d'apprentissage et le test de rétention (e.g., expérimentation 5). Cette persistance montre que les effets de l'apprentissage sur les dynamiques de coordination spontanée et requise n'ont rien d'aléatoire et sont loin d'être temporaires.

#### **4.5. Conclusion**

La différence des conséquences d'un même apprentissage sur les dynamiques de coordination en présence versus en l'absence d'une information comportementale est un résultat primordial encore inédit. Non seulement les patrons spontanés ne reflètent pas la dynamique de coordination initiale lorsque les patrons sont requis (absence du patron en phase), mais, de plus, les conséquences de l'apprentissage pour ces deux tâches n'ont aucune correspondance identifiable. D'autre part, avec des protocoles proches (balayage à différents moments de la session de pratique), nos expérimentations sur la posture et celles sur le système bi-manuel (e.g., Zanone & Kelso, 1992a) ont révélé des résultats plutôt divergents. Le but de la tâche et le système moteur considéré sont loin d'être des éléments négligeables du point de vue de la dynamique de coordination. Le fait que les effets de l'apprentissage obtenus dans des conditions particulières (avec un système effecteur particulier et avec des intentions particulières de l'apprenant) puisse se généraliser à

d'autres conditions doit recevoir une évaluation spécifique. Du point de vue plus général du contrôle moteur, nos résultats renforcent les conclusions de plusieurs travaux récents sur la sensibilité de la dynamique de coordination aux circonstances. Qu'il s'agisse de paramètres neuro-musculo-squelettiques (Carson, 2004), perceptifs (Mechsner, 2004), attentionnels (Temprado, 2004) ou intentionnels (Lee, 2004), la variation des éléments constituant la tâche a permis de bousculer certains principes de la dynamique de coordination qui semblaient établis. Il devient par exemple possible de repousser les limites de stabilité d'un patron intrinsèque (Temprado et al., 1999), d'inverser la hiérarchie des attracteurs (Carson et al., 2000), ou de produire des modes irréalisables dans d'autres circonstances (Mechsner et al., 2001).

Obhi (2004) effectue un bilan sur les catégories de tâches étudiées dans le domaine des coordinations bi-manuelles. Il met en évidence le manque frappant de recherches relatives aux tâches "orientées vers un objet" et "orientées vers un but". Pour l'auteur, ces termes définissent des tâches pour lesquelles des coordinations inter-segmentaires différentes permettent d'atteindre un même but d'action. Il souligne que la similitude de ces tâches par rapport à celles de la vie quotidienne donne une importance particulière à leur étude. Or, comparée à la recherche massive sur les coordinations bi-manuelles dont le mouvement relatif est requis, l'étude de coordinations non spécifiques n'a été que peu investie. Nous pouvons ajouter à l'analyse menée par Obhi que des systèmes effecteurs différents du système bi-manuel sont rarement considérés dans le domaine de l'apprentissage d'un point de vue dynamique. Les points de vue nouveaux offerts par l'étude du système hanche-cheville encouragent à investir d'autres systèmes effecteurs que les coordinations bi-manuelles pour comprendre l'apprentissage de nouvelles habiletés. De plus, l'altérité des effets de la pratique observée pour les coordinations spontanées et requises, démontre l'importance de la nature de la tâche dans l'identification des principes du processus d'apprentissage. Il paraît heuristique et prometteur dans l'avenir de prendre en compte les intentions de l'individu lorsque l'on cherche à définir les conséquences de l'apprentissage sur les coordinations préexistantes. Les effets de l'acquisition d'une nouvelle habileté semblent être différents lorsque la coordination est réalisée pour elle-même (cas de la danse ou de la gymnastique rythmique), ou lorsqu'elle est l'outil d'une action sur l'environnement (cas des sports collectifs et de la majorité des activités quotidiennes).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amazeen, P.G. (2002). Is dynamic the content of a generalized motor program for rhythmic interlimb coordination. *Journal of Motor Behavior*, 34, 233-251.
- 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.
- Bardy, B. G. (2004). Postural coordination dynamics in standing humans. In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends*. New York: Springer Verlag.
- Bardy, B. G., Faugloire, E., & Fourcade, P. (sous presse). Changes in postural patterns with learning and expertise. In M. Latash & F. Lestienne (Eds.), *Progress in Motor Control IV*. Springer Verlag.
- Bardy, B. G., Faugloire, E., & Stoffregen, T. A. The dynamics of learning new postural patterns. Article soumis.
- Bardy, B. G., Marin, L., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1284-1301.
- Bardy, B. G., Oullier, O., Bootsma, R. J., & Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 499-514.
- Batschelet, E. (1981). *Circular statistics in biology*. New York: Academic Press.
- Beek, P. J., Peper, C. E., & Stegeman, D. F. (1995). Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, 573-608.
- Bernstein, N. (1967). *The co-ordination and regulation of movement*. Elmsford, NY: Pergamon Press.

- Buchanan, J. J., & Horak, F. B. (1999). Emergence of postural patterns as a function of vision and translation frequency. *Journal of Neurophysiology*, *81*, 2325-2339.
- Buchanan, J. J., & Horak, F. B. (2001). Transitions in a postural task: Do the recruitment and suppression of degrees of freedom stabilize posture? *Experimental Brain Research*, *139*, 482-494.
- Buchanan, J. J., & Horak, F. B. (2003). Voluntary control of postural equilibrium patterns. *Behavioral Brain Research*, *143*, 121-140.
- Byblow, W. D., Carson, R. G., & Goodman, D. (1994). Expressions of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, *13*, 3-28.
- Carson, R. G. (1996). Neuromuscular-skeletal constraints upon the dynamics of perception-action coupling. *Experimental Brain Research*, *110*, 99-110.
- Carson, R. G. (2004). Governing coordination. Why do muscles matter? In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 103-121). New York: Springer Verlag.
- Carson, R. G., Riek, S., Smethurst, C. J., Parraga, J. F., & Byblow, W. D. (2000). Neuromuscular-skeletal constraints upon the dynamics of unimanual and bimanual coordination. *Experimental Brain Research*, *131*, 196-214.
- Faugloire, E., & Bardy, B. G. (2002). Expertise sportive et apprentissage d'une nouvelle coordination posturale. *Science & Motricité*. Article en révision.
- Faugloire, E., Bardy, B. G., Merhi, O., & Stoffregen, T. A. (sous presse). Exploring coordination dynamics of the postural system with real-time visual feedback. *Neuroscience Letters*.
- Faugloire, E., & Stoffregen, T. A. (2003). The dynamics of learning new postures. In S. Rogers, J. Effken (Eds.), *Studies in perception and action VII* (pp. 109-112). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Fisher, N. I. (1995). *Statistical analysis of circular data*. Cambridge: Cambridge University Press.



- Fontaine, R. J., Lee, T. D., & Swinnen, S. P. (1997). Learning a new bimanual pattern: Reciprocal influence of intrinsic and to-be-learned patterns. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, *51*, 1-9.
- Fuchs, A., Jirsa, V. K., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1996). Extending the HKB model of coordinated movement to oscillators with different eigenfrequencies. *Biological Cybernetics*, *74*, 21-30.
- Gentile, A. M. (1972). A working model of skill acquisition with application to teaching. *Quest*, *17*, 3-23.
- Haken, H. (1977). *Synergetics, an introduction: Nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry, and biology* (1st edition). Heidelberg: Springer Verlag.
- Haken, H. (1983). *Advanced synergetics: Instability hierarchies of self-organizing systems and devices* (1st edition). Heidelberg: Springer Verlag.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human movements. *Biological Cybernetics*, *51*, 347-356.
- Hodges, N. J., & Franks, I. M. (2002). Learning as a function of coordination bias: Building upon pre-practice behaviours. *Human Movement Science*, *21*, 231-258.
- Hodges, N. J., & Lee, T. D. (1999). The role of augmented information prior to learning a bimanual visual-motor coordination task: Do instructions of the movement pattern facilitate learning relative to discovery learning? *British Journal of Psychology*, *90*, 389-403.
- Horak, F. B., & Nashner, L. M. (1986). Central programming of postural movements: Adaptations to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, *55*, 1369-1381.
- Horak, F. B., Nashner, L. M., & Diener, H. C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, *82*, 167-177.

- 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.
- Kelso, J. A. S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 18, 63.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative, and Comparative*, 15, R1000-R1004.
- Kelso, J. A. S. (1994a). Elementary coordination dynamics. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 301–318). San Diego, CA: Academic Press.
- Kelso, J. A. S. (1994b). The informational character of self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science*, 13, 393-413.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns*. London: The MIT Press.
- Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (ed.), *Attention and Performance XIII* (pp. 139-169). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Kelso, J. A. S., Ding, M., & Schöner, G. (1992). Dynamic pattern formation: A primer. In A. Baskin & J. Mittenhal (Eds.), *Principles of organization in organisms* (pp. 397-439). Reading, MA: Addison-Wesley.
- 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., Scholz, J. P., & Schöner, G. (1986). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical fluctuations. *Physics Letters A*, 118, 279-284.

- Kelso, J. A. S., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979). On the nature of human interlimb coordination. *Science*, *203*, 1029–1031.
- Kelso, J. A. S., & Zanone, P. G. (2002). Coordination dynamics of learning and transfer across different effector systems. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*, 776-797.
- Ko, Y. G., Challis, J. H., & Newell, K. M. (2001). Postural coordination patterns as a function of dynamics of the support surface. *Human Movement Science*, *20*, 737-764.
- Ko, Y. G., Challis, J. H., & Newell, K. M. (2003). Learning to coordinate redundant degrees of freedom in a dynamic balance task. *Human Movement Science*, *22*, 47-66.
- Ko, Y. G., Challis, J. H., Stitt, J. P., & Newell, K. M. (2003). Organization of the compensatory postural coordination patterns. *Journal of Motor Behavior*, *35*, 325-342.
- Kostrubiec, V., & Zanone, P. G. (2002). Memory dynamics: Distance between the new task and existing behavioural patterns affects learning and interference in bimanual coordination in humans. *Neuroscience Letters*, *331*, 193-197.
- 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.), *Tutorial in motor behavior* (pp. 3-47). Amsterdam, NL: North Holland.
- Kurz, M. J., & Stergiou, N. (2002). Effects of normalisation and phase angle calculations on continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, *35*, 369-374.
- Lashley, K. S. (1930). Basic neural mechanisms in behavior. *Psychological Review*, *37*, 1-24.
- Lashley, K. S. (1942). The problem of cerebral organization in vision. In J. Cattell (Ed.), *Biological Symposia. Vol VII. Visual Mechanisms* (pp. 301-322). Lancaster, PA: Jaques Cattell Press.

- Lee, T. D. (2004). Intention in bimanual coordination performance and learning. In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 41-56). New York: Springer Verlag.
- Lee, T. D., Swinnen, S. P., & Verschueren, S. (1995). Relative phase alterations during bimanual skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 27, 263-274.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- Mardia, K. V. (1972). *Statistics of directional data*. London: Academic Press.
- Mardia, K. V., & Jupp, P. E. (2000). *Directional statistics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Stoffregen, T. A. (1999a). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal oriented stance. *Human Movement Science*, 18, 31-47.
- Marin, L., Bardy, B. G., & Bootsma, R. J. (1999b). Level of gymnastic skill as an intrinsic constraint on postural coordination. *Journal of Sport Sciences*, 17, 615-626.
- McCollum, G., & Leen, T. K. (1989). Form and exploration of mechanical stability limits in erect stance. *Journal of Motor Behavior*, 21, 225-244.
- Mechsner, F. (2004). A perceptual-cognitive approach to bimanual coordination. In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp.177-195). New York: Springer Verlag.
- Mechsner, F., Kerzel, D., Knoblich, G., & Prinz, W. (2001). Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, 414, 69-73.
- Monno, A., Chardenon, A., Temprado, J. J., Zanone, P. G., & Laurent, M. (2000). Effects of attention on phase transitions between bimanual coordination patterns: A behavioral and cost analysis in humans. *Neuroscience Letters*, 283, 93-96.
- Nashner, L. M. (1976). Fixed patterns of rapid postural responses among leg muscles during stance. *Experimental Brain Research*, 30, 13-24.

- Nashner, L. M., & McCollum, G. (1985). The organization of postural movements: A formal basis and experimental synthesis. *The Behavioral and Brain Sciences*, 8, 135-172.
- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B., & Black, F. O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80, 411-8.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: aspects of coordination and control* (pp. 341-360). Boston, MA: Martinus Nijhoff.
- Newell, K. M. (1991). Motor Skill Acquisition. *Annual Review of Psychology*, 42, 213-237.
- Newell, K. M. (1996). Change in movement and skill: Learning, retention, and transfer. In M. L. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development* (pp. 393-430). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Newell, K. M., & McDonald, P. V. (1994). Learning to coordinate redundant biomechanical degrees of freedom. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer P. (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 515-536). San Diego, CA: Academic Press.
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20, 695-715.
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in non-equilibrium systems*. New York: Wiley.
- Obhi, S. S. (2004). Bimanual coordination: an unbalanced field of research. *Motor Control*, 8, 111-120.
- Oullier, O., Bardy, B. G., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (2002). Postural coordination in looking and tracking tasks. *Human Movement Science*, 21, 147-167.

- Oullier, O., Bardy, B. G., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (2004). Task-specific Stabilization of Postural Coordination During Stance on a Beam. *Motor Control*, 7, 174-187.
- Oullier, O., Marin, L., Bootsma, R. J., Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2004). Variability in self-organization of postural patterns. In K. Davids, S. Bennett, & K. M. Newell (Eds.). *Variability in the movement system: A multi-disciplinary perspective*. Champaign: Human Kinetics Publishers, *in press*.
- Peters, B. T., Haddad, J. M., Heiderscheit, B. C., Van Emmerik, R. E. A., & Hamill, J. (2003). Limitations in the use and interpretation of continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, 36, 271-274.
- Raibert, M. H. (1977). *Motor control and learning by the state-space model*. Cambridge, MA: Artificial Intelligence Laboratory, MIT.
- Reuchlin, M. (1977). *Psychologie* (6th edition). Paris: PUF.
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1988). Affordances as constraints on the control of stance. *Human Movement Science*, 7, 265-300.
- Riley, M. A., Santana, M. V., & Turvey, M. T. (2001). Deterministic variability and stability in detuned bimanual rhythmic coordination. *Human Movement Science*, 20, 343-369.
- Ruelle, D., & Takens, F. (1971). On the nature of turbulence. *Communications in mathematical Physics*, 20, 167-192.
- Schmidt, R. A. (1982). *Motor control and learning: A behavioural emphasis* (1st edition). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. (1998). *Motor control and learning: A behavioural emphasis* (3rd edition). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. C., & Fitzpatrick, P. (1996). Dynamical perspective on motor learning. In H.N. Zelaznik (Ed.), *Advances in Motor Learning and Control* (pp. 195-223). Champaign, IL: Human Kinetics.

- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1989). A quantitative approach to understanding the formation and change of coordinated movement patterns. *Journal of Motor Behavior*, *21*, 122-144.
- Scholz, J., Kelso, J. A. S., Schöner, G. (1987). Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical slowing down and switching time. *Physics Letters A*, *123*, 390-394.
- Schöner, G. (1989). Learning and recall in a dynamic theory of coordination patterns. *Biological Cybernetics*, *62*, 39-54.
- Schöner, G., Haken, H., Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, *53*, 247-257.
- Schöner, G., & Kelso, J. A. S. (1988). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination I. Relative phase dynamics. *Biological Cybernetics*, *58*, 71-80.
- Schöner, G., Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992). Learning as change of coordination dynamics: Theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, *24*, 29-48.
- Semjen, A. (1994). Qu'y a-t-il de programmé dans les activités motrices ? Les avatars du programme moteur. *Science & Motricité*, *23*, 48-57.
- Serrien, D. J., & Swinnen, S. P. (1997). Coordination constraints induced by effector combination under isofrequency and multifrequency conditions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *23*, 1493-1510.
- Smethurst, C. J., & Carson, R. G. (2001). The acquisition of movement skills: Practice enhances the dynamic stability of bimanual coordination. *Human Movement Science*, *20*, 499-529.
- Sternad, D. (2000). Debates in dynamics: A dynamical systems perspective on action and perception. *Human Movement Science*, *19*, 407-423.

- Swinnen, S. P., & Carson, R. G. (2002). The control and learning of patterns of interlimb coordination: past and present issues in normal and disordered control. *Acta Psychologica, 110*, 129-137.
- Swinnen, S. P., Dounskaia, N., Verschueren, S., Serrien, D. J., & Daelman, A. (1995). Relative phase destabilization during interlimb coordination: The disruptive role of kinesthetic afferences induced by passive movement. *Experimental Brain Research, 105*, 439-54.
- Swinnen, S. P., Lee, T. D., Verschueren, S., Serrien, D. J., & Bogaerds, H. (1997). Interlimb coordination: Learning and transfer under different feedback conditions. *Human Movement Science, 16*, 749-785.
- Swinnen, S. P., Walter, C. B., Lee, T. D., & Serrien, D. J. (1993). Acquiring bimanual skills: Contrasting forms of information feedback for interlimb decoupling. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 19*, 1328-1344.
- Swinnen, S. P., Young, D. E., Walter, C. B., & Serrien, D. J. (1991). Control of asymmetrical bimanual movements. *Experimental Brain Research, 85*, 163-173.
- Temprado, J. J. (2004). A dynamical approach to the interplay of attention and bimanual coordination. In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 21-39). New York: Springer Verlag.
- 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*, 1579-1594.
- 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. (1990). Coordination. *American Psychologist, 45*, 938-953.
- Turvey, M. T., Fitch, H. L., & Tuller, B. (1982). The Bernstein perspective: I. The problems of degrees of freedom and context – coordinations variability. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior* (pp. 239-252). Mahwah, NJ: Erlbaum.



- Turvey, M. T., Shaw, R. E., & Mace, W. (1978). Issues in the theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In J. Requin (Ed.), *Attention and performance*, Vol. 7 (pp. 557-595). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Verschueren, S. M., Swinnen, S. P., Dom, R., & De Weerdts W. (1997). Interlimb coordination in patients with Parkinson's disease: Motor learning deficits and the importance of augmented information feedback. *Experimental Brain Research*, 113, 497-508.
- von Holst, E. (1973). *The behavioral physiology of animal and man: The collected papers of Erich von Holst (R. Martin, Trans.)* (Vol.1). Coral Gables, FL: University of Miami Press. (Original work published 1937).
- Walter, C. B., & Swinnen, S. P. (1992). Adaptive tuning of interlimb attraction to facilitate bimanual decoupling. *Journal of Motor Behavior*, 24, 95-104.
- Walter, C. B., & Swinnen, S. P. (1994). The formation and dissolution of bad habits during the acquisition of coordination skills. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 491-513). San Diego, CA: Academic Press.
- Wenderoth, N., & Bock, O. (2001). Learning of a new bi-manual coordination pattern is governed by two distinct processes. *Motor control*, 5, 23-35.
- Wenderoth, N., Bock, O., & Krohn, R. (2002). Learning a new bimanual coordination pattern is influenced by existing attractors. *Motor Control*, 6, 166-182.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*. Paris, Cambridge-Mass., and New York / Hermann & Cie., the Technology Press, and John Wiley & Sons.
- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (2nd edition). New York: John Wiley.
- Wulf, G., & Prinz, W. (2001). Directing attention to movement effects enhances learning: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 648-660.

- Yamanishi, J., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, 37, 219-225.
- Zaal, F., Bingham, G., Schmidt, R., & Richard, C. (2000). Visual perception of mean relative phase and phase variability. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1209-1220.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992a). 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. (1992b). Learning and transfert as dynamical paradigms for behavioural change. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorial in motor behavior II* (pp. 563-582). Amsterdam, NL: Elsevier Science Publishers.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1994). The coordination dynamics of learning: Theoretical structure and experimental agenda. In S. Swinnen, H. Heuer, J. Massion, & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraints* (pp. 571-593). San Diego, CA: Academic Press.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer. Collective and component variables. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1454-1480.
- Zanone, P. G., & Kostrubiec, V. (2004). Searching for (dynamic) principles of learning. In V. K. Jirsa & J. A. S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 57-89). New York: Springer Verlag.
- Zanone, P. G., Monno, A., Temprado, J. J., & Laurent, M. (2001). Shared dynamics of attentional cost and pattern stability. *Human Movement Science*, 20, 765-789.

## Approche dynamique de l'apprentissage de coordinations posturales

---

**Résumé.** L'approche dynamique de l'apprentissage moteur fournit de nombreux principes théoriques définissant les liens d'interdépendance entre les coordinations préexistantes et l'apprentissage d'un nouveau mode de coordination. Bien que ces principes se veuillent généraux, ils sont principalement basés sur l'étude du système bi-manuel et ont été évalués quasi-exclusivement dans ce contexte. Ce travail doctoral étudie l'interaction entre les modes préexistants et l'apprentissage d'un nouveau patron dans le cadre différent du système postural. A cette fin, la dynamique de coordination hanche-cheville est investiguée à différents moments du processus d'apprentissage et au regard de deux tâches de nature distincte. Pour le premier type de tâche, le but du participant est sans rapport avec la coordination hanche-cheville, celle-ci émerge alors de façon *spontanée*. En accord avec les prédictions théoriques de l'approche dynamique, nous observons une modification des patrons de coordination initiaux, en phase et en anti-phase, en direction du patron appris. Pour le second type de tâche, différents modes de coordination hanche-cheville sont *requis*, et constituent le but de la tâche. Dans ce cas, l'apprentissage du nouveau patron a pour conséquence une amélioration de l'ensemble des patrons requis. Ce résultat ne présente pas de correspondance identifiable avec la dynamique de coordination posturale spontanée (mise au jour avec le premier type de tâche), et diverge des observations expérimentales obtenues dans le cadre des coordinations bi-manuelles. Les raisons théoriques et fonctionnelles sous-tendant ces divergences sont discutées.

---

**Mots clés.** Système postural, coordinations hanche-cheville, apprentissage moteur, approche dynamique

---

## Dynamical perspective on learning postural coordinations

---

**Abstract.** The dynamical perspective on motor learning provides numerous theoretical principles which define the links of interdependency between pre-existing coordination and a new learned coordination mode. Although these principles are supposed to be general, they are principally based on bi-manual system studies and were assessed almost exclusively in this context. In this thesis, we studied the interaction between pre-existing modes and learning a new pattern in the different framework of the postural system. The ankle-hip coordination dynamics was investigated at various moments of the learning process and in two tasks of distinct nature. In the first task, the goal of the participants bore no relation with the ankle-hip coordination, which emerged *spontaneously*. In accordance with theoretical predictions from the dynamical perspective, we found a change from initial coordination patterns, in-phase and anti-phase, toward the learned pattern. For the second task, different modes of ankle-hip coordination were *required*, and constituted the goal of the task. In that case, the consequence of learning the new pattern was an improvement of every required pattern. This result presents no identifiable correspondence with the spontaneous coordination dynamics (revealed in the first task), and diverges from experimental observations obtained with bi-manual coordination. The theoretical and functional reasons underlying these divergences are discussed.

---

**Keyword.** Postural system, ankle-hip coordination, motor learning, dynamical perspective

---