



**Rapport de recherche présenté en vue de l'obtention du  
MASTER RECHERCHE SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN**

**PARCOURS PERCEPTIVO-MOTEUR ET APPRENTISSAGE**

**Laboratoire Efficience et Déficience Motrices (E.A. 2991)**

**HARMONISATION DES STRUCTURES TEMPORELLES  
DE DEUX SYSTEMES COMPLEXES COUPLÉS**

**Présenté par**

**MARMELAT Vivien**

**Sous la direction de :  
DELIGNIERES Didier (Pr)**

**Juin 2010**

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1. Le bruit $1/f$ comme marqueur de la coordination multi-échelles.....	2
1.2. La coordination comme produit des complexités homogènes.....	5
1.3. Le paradigme des coordinations interpersonnelles comme outil d'étude.....	7
1.4. Hypothèses.....	9
<b>2. Méthode.....</b>	<b>9</b>
2.1. Sujets.....	9
2.2. Dispositif et matériel.....	10
2.3. Tâches et procédures.....	10
2.4. Traitement des données .....	12
2.4.1. <i>Calcul des séries de périodes et de phase relative .....</i>	<i>12</i>
2.4.2. <i>Analyses classiques de la moyenne et de la variabilité.....</i>	<i>12</i>
2.4.3. <i>Calcul de la variance locale.....</i>	<i>13</i>
2.4.4. <i>Estimation des exposants fractals .....</i>	<i>13</i>
2.4.5. <i>Comparaison inter-conditions.....</i>	<i>14</i>
<b>3. Résultats .....</b>	<b>15</b>
3.1. Moyennes et variabilités .....	15
3.2. Estimation des exposants fractals .....	18
3.3. Corrélations.....	18
<b>4. Discussion.....</b>	<b>20</b>
<b>5. Conclusion.....</b>	<b>24</b>
<b>6. Références .....</b>	<b>24</b>

## 1. Introduction

La coordination apparaît comme une qualité indispensable au fonctionnement optimal des systèmes biologiques ; chez l'être humain, des interactions entre les multiples composants du système neuro-musculo-squelettique apparaissent à toutes les échelles, par exemple dans des comportements tels que la locomotion, qui est le produit d'interactions inter- mais aussi intra-segmentaires. Des processus de coordinations ont également été mis en évidence au niveau des zones cérébrales (Kelso, 1995 ; Lagarde, Tognoli & Kelso, 2006). Il existe donc des interactions entre les multiples structures et fonctions d'un système, les processus de coordination pouvant intervenir entre des composants d'échelles temporelles différentes. La présence de nombreuses interactions non-linéaires entre les composants d'un système complexe agissant à de multiples échelles temporelles produit une interdépendance entre les sous-fonctions (Kello et al., 2007 ; Van Orden, Holden & Turvey, 2005). L'existence de cette interdépendance conduit à envisager un continuum d'interactions mutuelles entre les échelles

microscopiques et macroscopiques (Figure 1), au-delà d'une encapsulation hiérarchique des structures (Ihlen & Vereijken, in press). Dans cette perspective les composants interagissent si étroitement qu'on ne peut plus analyser leur contribution individuelle dans le comportement global. La dynamique de chaque composant est étroitement liée à l'activité d'un grand nombre

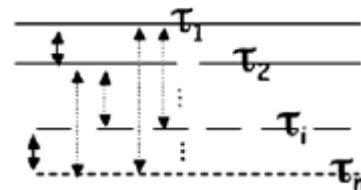


Figure 1 : Illustration de la coordination entre les échelles ( $\tau_i$  : niveau d'échelle)

d'autres composants (Bressler & Kelso, 2001) et la mesure d'une activité isolée ne peut renseigner sur la fonction du composant isolé puisque les activités et les fonctions sont toujours réalisées dans le cadre d'une coordination générale entre tous les éléments du système (Kello et al., 2007). C'est davantage les interactions mutuelles entre les composants que la dynamique intrinsèque des composants particuliers qui influencent le comportement global du système, et l'on a parlé à cet égard de « dynamique interaction-dominante » (Turvey, 2007 ; Van Orden, Holden & Turvey, 2003).

Le système neuro-musculo-squelettique est un système complexe qui présente un grand nombre de composants (790 muscles, 100 articulations,  $10^{12}$  neurones et

connections neuronales...). Il est remarquable qu'en dépit de la quantité de sous-systèmes présents on puisse observer des relations entre tous les composants à toutes les échelles, qui impliquent des coordinations entre les différentes échelles pour produire des comportements stables et flexibles. Ces comportements peuvent être analysés notamment au travers des séries temporelles produites par le système. Ces analyses, basées sur les fluctuations du paramètre mesuré, peuvent fournir des informations sur l'organisation interne du système, sur ce que l'on pourrait définir comme son « niveau de complexité ».

Il convient cependant de s'accorder sur le terme de « complexité », qui peut renvoyer à différentes définitions (Goldberger, Peng & Lipsitz., 2002 ; Vaillancourt & Newell, 2002). La complexité est liée d'une part à la présence de nombreux composants dans le système, mais également à la richesse des interactions entre ces composants. Dans ce sens, un système dominé par un ensemble restreint de composants présente un degré de complexité moindre qu'un système associant de multiples composants. A l'opposé, un système comprenant de multiples composants indépendants présente une faible complexité, liée à sa faible organisation interne. Dans le premier cas le système peut être considéré comme trop ordonné, et dans le second trop aléatoire. La complexité apparaît ainsi comme un compromis optimal entre l'ordre trop réglé de systèmes surdéterminés, et le désordre de systèmes sans organisation. L'analyse des séries temporelles produites par les systèmes permet de diagnostiquer le niveau d'organisation interne, et donc de complexité, des systèmes. On considère alors qu'un système complexe est associé à une évolution temporelle qui possède une structure riche sur de multiples échelles temporelles (Duarte & Sternad, 2008 ; Goldberger et al., 2002).

### **1.1. Le bruit $1/f$ comme marqueur de la coordination multi-échelles**

Cette relation entre les échelles temporelles peut être révélée par l'étude des séries temporelles produites par les systèmes biologiques. L'étude de la variabilité du comportement s'est longtemps contentée de l'analyse des écart-types autour de la moyenne, considérant a priori les fluctuations comme du bruit non significatif qui était à négliger voire à exclure par filtrage avant analyse (Slifkin & Newell, 1998). Le développement des outils d'analyse non-linéaire a cependant permis de mettre en

évidence une structure particulière des fluctuations dans les séries temporelles produites par la plupart des systèmes biologiques sains. Ces séries possèdent des propriétés statistiques particulières qui se retrouvent à toutes les échelles temporelles. L'analyse spectrale, qui décompose le signal original en une multitude de signaux sinusoïdaux de fréquences et d'amplitudes variées, révèle notamment une relation de type puissance entre la fréquence du signal et son amplitude au carré (sa puissance) :

$$S(f) \propto 1/f^\beta \quad (1)$$

Cette relation a été popularisée au travers de la dénomination de « processus  $1/f^\beta$  »,  $\beta$  représentant l'exposant fractal caractéristique de la fonction puissance. Dans la plupart des systèmes biologiques sains l'exposant  $\beta$  (estimé au travers de la valeur opposée de la pente du spectre en coordonnées

bi-logarithmiques) est proche de 1 (Figure 2), c'est pourquoi on utilise communément l'expression « bruit  $1/f$  » ou « corrélations à long terme », qui suggère qu'un événement de la série « garde en mémoire » la structure des événements d'un passé plus lointain que les quelques valeurs le précédant (Eke et al., 2000 ; Goldberger, 1999 ; Hausdorff et al., 1995 ; Wagenmakers, Farell & Ratcliff, 2004). Dans ce cas l'amplitude du signal est inversement proportionnelle à sa fréquence d'oscillation, c'est-à-dire que des signaux à

hautes fréquences de faibles amplitudes sont nichés dans des signaux de basses fréquences à haute amplitude. Cette distribution uniforme de la puissance (proportionnelle aux échelles de temps) indique qu'une même dynamique a lieu à toutes les échelles du système, et donc qu'aucune échelle temporelle ne domine dans la réponse donnée par l'organisme : le comportement peut donc être vu comme le produit de la collaboration étroite entre les multiples sous-systèmes agissant à différentes échelles.

Ces propriétés font du bruit  $1/f$  le garant de l'adaptabilité du système, présentant le meilleur compromis entre la stabilité des interactions coordonnées entre les multiples

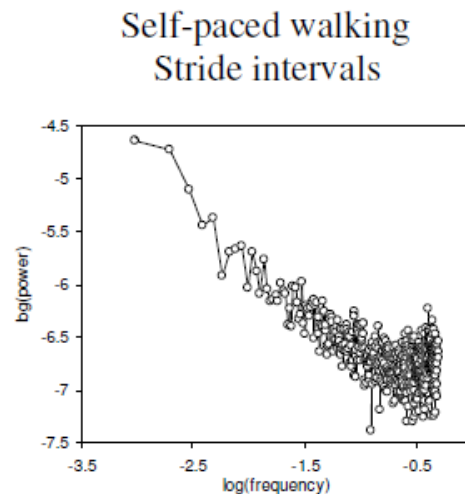


Figure 2 : Illustration de l'analyse spectrale d'une série temporelle. La pente négative et linéaire du graphe indique clairement la présence de bruit  $1/f$ . (Delignières & Torre, 2009).

sous-systèmes et la flexibilité du comportement face aux contraintes internes ou externes. Le bruit  $1/f$  semble être la signature des systèmes sains et adaptatifs et dans ce cadre il a été mis en évidence dans de nombreux travaux, par exemple dans les tâches de tapping (Chen, Ding & Kelso, 1997 ; Delignières, Lemoine & Torre, 2004), dans la production d'intervalles temporels (Gilden Thornton & Mallon, 1995), dans l'analyse du rythme cardiaque (Goldberger, 1999 ; Peng et al., 1995) ou encore dans celle de la marche (Hausdorff et al., 1995 ; Jordan, Challis & Newell, 2007). On a pu a contrario démontrer l'altération du bruit  $1/f$  dans les systèmes pathologiques ou vieillissants (Goldberger, 1999 ; Hausdorff et al., 1997), l'intensité des corrélations à long terme étant corrélée au degré de sévérité de la pathologie dans le cas de la maladie de Huntington (Hausdorff et al., 1997). La pente du spectre s'approchant d'une valeur nulle ( $\beta=0$ , caractéristique du bruit blanc décorréolé) témoigne d'une indépendance entre les composants du système, menant à une instabilité aléatoire, tandis que des valeurs supérieures à 1 caractérisent soit la domination du système par un de ses composants, soit un couplage trop rigide entre éléments constitutifs.

La présence de bruit  $1/f$  semble donc être le marqueur d'un « niveau de complexité » optimal, le témoin de l'organisation interne des systèmes complexes sains en conditions normales, entre des composants agissant à de multiples échelles temporelles. L'interdépendance entre les échelles suggère que toute mesure répétée du comportement d'un système complexe, quel que soit le niveau où cette mesure est réalisée, présente des fluctuations en  $1/f$  (Kello et al., 2007 ; Turvey, 2007). Par exemple, Torre et Delignières (2008) ont montré dans une tâche de coordination bimanuelle que les séries de périodes produites par chacun des effecteurs contenaient des fluctuations en  $1/f$ , mais que ce type de fluctuation était aussi présent dans la phase relative  $\Phi$  (qui rend compte de la coordination entre les effecteurs). En d'autres termes, chaque effecteur constitue en soi un système complexe, et le couplage des deux effecteurs fait émerger un nouveau système complexe, possédant des propriétés fractales similaires. La coordination entre les deux effecteurs, dans ce cas, peut être considérée comme l'un des processus (macroscopique) de coordination dans le système global, processus se coordonnant lui-même avec d'autres processus agissant à des échelles de temps différentes.

## 1.2. La coordination comme produit des complexités homogènes

Lorsque deux systèmes se coordonnent il est nécessaire qu'ils partagent un certain nombre d'informations afin qu'une forme de « communication » puisse s'établir entre eux. Il semble exister une relation subtile entre les échanges d'informations entre les réseaux et la complexité de ces réseaux (West, Geneston & Grigolini, 2008). Plusieurs systèmes complexes, possédant chacun leur propre dynamique, seraient susceptibles d'adopter un comportement relativement synchronisé, comme cela peut être le cas lors des applaudissements d'une foule à la fin d'un spectacle (Néda et al., 2000) ou quand deux personnes marchent côte-à-côte (van Ulzen et al., 2008 ; Zivotofsky & Hausdorff, 2007). La synchronisation serait d'autant plus forte que les systèmes partagent le même type de structure complexe : on parle alors d'« effet d'harmonisation des complexités » (*complexity matching effect*, West et al., 2008). Cette hypothèse postule qu'il pourrait exister une sorte de « résonance » entre des réseaux complexes partageant le même « type » de complexité, en particulier les systèmes présentant une structure temporelle du type bruit  $1/f$ . Par exemple Jennings et al. (2004) ont montré que l'intensité de la musique présentait une structure de type bruit  $1/f$ . On sait également que le cerveau est un réseau complexe qui présente du bruit  $1/f$  (Bédart, Kroger & Destexhe, 2006 ; Kello et al., 2007) : une structure complexe comme le cerveau pourrait être sensible au stimulus exercé par un autre réseau en  $1/f$  tel que la musique ou la peinture (Alvarez-Ramirez et al., 2008 ; Taylor, Micolich & Jonas, 1999).

L'hypothèse de l'« effet d'harmonisation des complexités » permettrait donc de comprendre par exemple pourquoi la musique déclenche des émotions, si l'on fait l'hypothèse qu'il existe une sorte de résonance entre des réseaux qui partagent la même complexité, une complexité de type « bruit  $1/f$  ». Cela suggère que des systèmes présentant le même type de complexité devraient, en se couplant, s'adapter au système partenaire en adoptant la même organisation interne, c'est-à-dire la même structure temporelle, révélée par les exposants fractals. Ce type d'adaptation a été mis en évidence par exemple dans une tâche de tapping en synchronisation avec un signal chaotique, c'est-à-dire totalement imprévisible (Stephen et al., 2008). Les résultats de cette étude montrent que les sujets produisent des séries (basées sur les asynchronies avec le métronome chaotique) dont la structure est étroitement corrélée à la structure du

signal lui-même (Figure 3). La consigne était bien donnée aux sujets de se coordonner le mieux possible avec le métronome, mais sa nature chaotique et donc imprévisible empêchait toute anticipation.

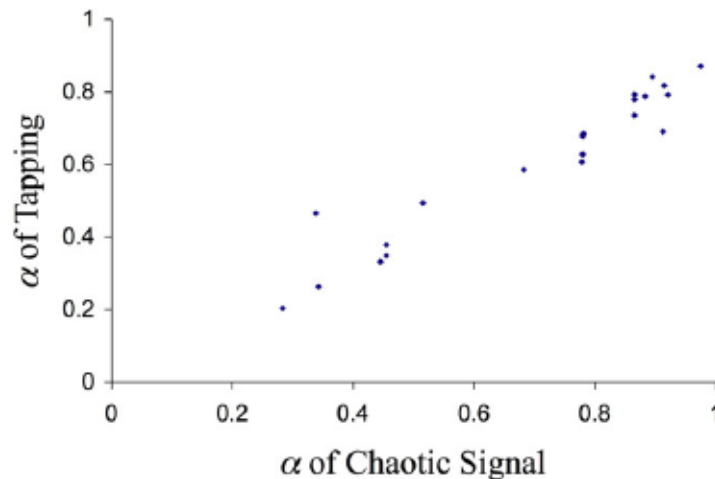


Figure 3 : corrélation ( $r=0.96$ ,  $p<0.001$ ) entre l'exposant fractal d'un signal chaotique et l'exposant fractal des séries de tapping associées (Stephen et al., 2008).

Les auteurs expliquent leurs résultats à partir du phénomène de *strong anticipation*. L'anticipation classique, ou *weak anticipation* (Dubois, 2003), considère qu'un système « esclave » prédit le comportement d'un système « maître » via un modèle interne afin de réaliser la tâche non pas de façon réactive au stimulus mais de manière proactive. Dans cette approche classique de l'anticipation le couplage permet à l'esclave de s'adapter aux états du maître et donc à sa structure statistique. Dans ce cas la propriété de *weak anticipation* est donc une propriété du système esclave seulement. Au contraire la propriété de *strong anticipation* est une propriété du système global formé par l'esclave et le maître (Stepp & Turvey, 2009). La notion de *strong anticipation* permet de s'affranchir de modèle prédictif : l'organisme et son environnement forment un seul système dont la structure temporelle s'étend au-delà du court terme. Au lieu de prédictions localisées on observe une coordination globale sur toutes les échelles temporelles, qui peut être étudiée à partir des corrélations à long terme. Le système esclave ne s'adapte donc pas aux états du maître mais bien à sa structure statistique (Stephen et al., 2008). La *strong anticipation* serait donc la dépendance des corrélations à long terme (*i.e.* de la structure) de l'organisme sur les corrélations à long terme de son environnement.

Cependant l'étude de Stephen et al. (2008) mettait en jeu un seul système (le sujet) s'adaptant à un autre (le signal chaotique), or il serait plus logique d'étudier l'adaptation réciproque de deux systèmes complexes. Dans le cadre des coordinations bimanuelles, Torre et Delignières (2007) ont montré que les deux effecteurs couplés coordonnés produisaient des séries temporelles dont les exposants fractals étaient similaires. Dans ce cas le couplage entre les effecteurs est neuro-musculaire, et les deux effecteurs bien que possédant les caractéristiques statistiques de systèmes complexes peuvent être perçus comme faisant partie intégrante d'un seul système. Coupler deux systèmes complexes a priori indépendants pourrait permettre d'étudier l'évolution de leur structure temporelle en manipulant la disponibilité des informations dont ils disposent. Les études citées précédemment suggèrent que des systèmes de même « niveau » de complexité transfèrent plus facilement des informations entre eux et donc parviennent à une synchronisation plus durable et plus stable. On peut donc supposer que les systèmes produiront des structures d'autant plus similaires que les informations qu'ils seront susceptibles d'échanger seront importantes. Nous allons donc analyser l'organisation interne de deux systèmes complexes coordonnés et manipuler la force du couplage grâce au paradigme expérimental des coordinations interpersonnelles.

### **1.3. Le paradigme des coordinations interpersonnelles comme outil d'étude**

D'une manière générale le paradigme expérimental des coordinations interpersonnelles s'interroge sur la dynamique des processus mis en action quand deux personnes réalisent une tâche de manière coordonnée, intentionnellement ou non, et tente de trouver les facteurs sociaux principaux de la coordination, tels que le langage (Richardson, Marsh & Schmidt, 2005) ou les variables physiques (Schmidt et al., 1994). Une tâche récurrente dans ce genre d'expérience est la manipulation de pendules manuels : des travaux ont mis en évidence des similitudes entre la dynamique des coordinations bimanuelles et celle des coordinations interpersonnelles (Schmidt, Carello, & Turvey, 1990). Ces études ont montré que lorsqu'il est demandé à deux sujets de coordonner visuellement les mouvements de leurs jambes ou de pendules manuels, les patrons de coordination en phase (phase relative  $\Phi = 0^\circ$ ) et en antiphase (phase relative  $\Phi = 180^\circ$ ) sont les deux seuls patrons qui émergent spontanément, le

patron en phase étant plus stable que le patron en antiphase (Schmidt et al., 1990 ; Schmidt et al., 1998). On observe également une transition du mode en anti-phase vers le mode en phase lorsque la fréquence d'oscillation est augmentée, précédée d'une augmentation de l'amplitude des fluctuations ; la transition est irréversible une fois accomplie, même lorsque la fréquence d'oscillations diminue progressivement. Ces résultats laissent supposer que les mêmes principes guident la dynamique des coordinations interpersonnelles et la dynamique des coordinations bimanuelles. Des auteurs ont également montré que les individus tendent à se coordonner à leur insu, de manière non-intentionnelle même lorsque la consigne leur est donné de suivre leur propre rythme (Issartel, Marin & Cadopi, 2007 ; Richardson et al., 2007 ; Schmidt, Shaw & Turvey, 1993). Dans ce cas la coordination est relative puisqu'on observe seulement des périodes d'occurrence plus fréquentes des modes préférentiels de coordination (phase et anti-phase) parmi toutes les valeurs possibles de phase relative qui sont réalisées. Le mode de coordination en phase est un patron de coordination qui émerge spontanément donc qui ne requiert aucun apprentissage de la part des sujets, on pourra donc moduler la force du couplage tout en permettant aux sujets de rester coordonnés.

Le couplage représente les processus permettant aux effecteurs de se coordonner. Dans le cadre des coordinations bimanuelles le couplage est neuromusculaire, tandis que dans le cadre des coordinations interpersonnelles le couplage est basé sur les retours perceptifs qu'entretiennent les sujets avec leur partenaire et l'environnement (Schmidt et al., 1998). Les boucles rétroactives sont notamment d'ordre visuel (Issartel et al., 2007 ; Schmidt & O'Brien, 1997), auditif (Néda et al., 2000 ; Shockley, Santana & Fowler, 2003) ou haptique (Nessler & Gilliland, 2009), et la plupart des études portant sur les coordinations interpersonnelles considèrent que ce couplage perceptif est à la base de la coordination entre les sujets, l'absence de retour perceptif bloquant l'émergence des modes de coordination spontanés (Nessler & Gilliland, 2009). La force du couplage qui lie les mouvements de deux personnes se synchronisant reste cependant inférieure à celle liant les effecteurs dans les tâches de coordinations bimanuelles (Schmidt, Carello, & Turvey, 1990). Nous allons donc manipuler la force du couplage entre les sujets en modulant les retours perceptifs dont ils peuvent disposer.

## 1.4. Hypothèses

Notre travail repose sur une approche qui considère que les composants d'un système complexe interagissent à de multiples échelles temporelles, déterminant la « coordination interne » du système ; cette interdépendance entre les différentes échelles nous autorise à considérer la coordination observée au niveau macroscopique comme un indice de la coordination interne, et donc du « niveau de complexité » du système, dont le bruit  $1/f$  semble être un marqueur pertinent. Nous allons nous servir des coordinations interpersonnelles dans une tâche de manipulation de pendules en modulant la force du couplage entre les sujets, c'est-à-dire en modulant les retours sensoriels dont ils peuvent disposer pour se coordonner. Les séries de périodes produites par les pendules seront considérées comme un marqueur de la complexité de chaque système, la phase relative entre les pendules renseignant sur la coordination du système global qu'ils formeront. On peut supposer qu'augmenter le couplage devrait stabiliser la coordination entre les systèmes, donc que les séries de phases relatives devraient présenter des structures plus complexes lorsque le couplage est fort. De plus nous faisons l'hypothèse que l'existence d'interactions réciproques entre les deux systèmes coordonnés devrait se caractériser par des valeurs d'exposants fractals des séries de périodes de chaque système qui tendront à s'harmoniser avec une force de couplage augmentée. On devrait également observer une diminution de la variabilité globale avec le couplage, témoignant d'une stabilisation du comportement, à la fois sur les séries de périodes et les séries de phase relative.

## 2. Méthode

### 2.1. Sujets

22 volontaires (16 hommes et 6 femmes) d'une moyenne d'âge de 24.5 ans ( $\pm$  2.9) ont participé à l'étude, constituant 11 paires formées aléatoirement (sans tenir compte ni de l'âge ni du sexe). Tous les sujets ont déclaré disposer d'une audition normale et d'une vue normale ou corrigée. Tous les sujets étaient en bonne santé et aucun ne présentait de troubles neuromusculaires ou de traumatismes récents lors de l'étude.

## 2.2. Dispositif et matériel

Les sujets (16 droitiers et 6 gauchers) manipulaient un seul pendule avec la même main durant tous les essais. Un tirage au sort déterminait lequel des deux sujets utiliserait la main droite, l'autre sujet utilisant donc sa main gauche. Les sujets étaient assis côte-à-côte entre les deux pendules (sujet à gauche-main gauche, sujet à droite-main droite) de façon à ce que chaque partenaire puisse voir les oscillations des deux pendules, les pendules oscillant dans un axe parallèle au plan sagittal des sujets. Les pendules étaient espacés de 1.10 m, ils mesuraient 0.48 m (du bas de la poignée au bas du pendule), la masse fixée à leur extrémité pesait 0.150 kg. La distance entre le bas de la poignée et le centre de la masse, déterminant la fréquence naturelle du pendule, était maintenue constante pour tous les sujets dans toutes les conditions (0.47 m). Les pendules étaient fixés sur un axe de rotation, ce qui nous a permis de mesurer leurs variations d'angles en reliant des potentiomètres au niveau de l'axe de rotation des pendules (ces potentiomètres possédaient une marge d'erreur de  $0.5^\circ$ ). Nous avons enregistré ces variations d'angle à une fréquence de 50 Hz. Les sujets ne voyaient ni l'expérimentateur ni l'écran sur lequel défilaient les oscillations.

## 2.3. Tâches et procédures

Les sujets avaient pour consigne de maintenir fermement la poignée avec l'ensemble de la main afin de manipuler le pendule uniquement avec l'articulation du poignet, selon un mouvement d'abduction-adduction. L'avant-bras des sujets était parallèle à l'horizontale sans reposer sur aucun support. Ils devaient observer le silence dans toutes les conditions, la communication orale pouvant contribuer à la synchronisation des systèmes (Shockley, Santana & Fowler, 2003). Ils étaient convoqués une seule fois pour réaliser deux sessions :

- Une session « individuelle » dans laquelle il était demandé à chaque sujet de faire osciller son pendule individuellement à sa fréquence préférentielle, correspondant à la fréquence d'oscillation la plus confortable pour eux, qu'ils étaient capable de maintenir tout au long de l'essai avec la plus grande régularité

(condition « *solo* »). Le sujet fixait visuellement une cible placée sur le mur devant lui, il ne disposait d'aucune contrainte auditive et plaçait sa main non-manipulatrice sur sa cuisse homolatérale. Cette condition était réalisée en premier pour tous les sujets, le partenaire n'ayant pas accès à la salle d'expérimentation.

- Une session « couplé » dans laquelle les sujets faisaient osciller leur pendule côte à côte dans trois conditions distinctes où l'expérimentateur manipulait le couplage perceptif (visuel, auditif, haptique). Les sujets avaient pour consigne de faire osciller les pendules en phase, c'est-à-dire que les deux pendules soient parfaitement synchronisés, à la fréquence préférentielle du couple de la manière la plus régulière possible. Les sujets n'étaient pas autorisés à communiquer entre les essais. Ils devaient absolument garder le mode de coordination en phase constant afin que nous puissions réaliser nos analyses par la suite, qui nécessitent de disposer de séries ne présentant pas de rupture. Si les sujets se désynchronisaient trop fortement ils devaient recommencer la condition. Les trois conditions étaient les suivantes :
  - condition « faible » : avec pour seul retour sensoriel la vue, l'ouïe étant limitée grâce à des bouchons d'oreilles, et leur main libre étant posée sur leur cuisse homolatérale, entraînant un faible niveau de couplage interpersonnel ; les sujets devaient regarder une cible sur le mur droit devant eux (la même pour les deux sujets), de manière à garder le pendule du partenaire dans leur vision périphérique ;
  - condition « moyen » : avec pour retour sensoriel la vue et l'ouïe ; les sujets regardaient le pendule de leur partenaire pendant la durée de l'essai ; leur main libre était posée sur leur cuisse homolatérale ;
  - condition « fort » : avec pour retour sensoriel la vue, l'ouïe et le toucher ; les sujets regardaient le pendule de leur partenaire et ils croisaient leur bras libre (« bras dessus-bras dessous »).

L'ordre de passage des 3 conditions « couplé » était randomisé pour éviter d'éventuels biais expérimentaux d'apprentissage. Afin que les sujets conservent leur attention sur la tâche, l'expérimentateur leur rappelait de se concentrer et de se coordonner en restant régulier, au bout de 6, 9 et 11 minutes.

Chaque condition durait environ 12 minutes, soit le temps nécessaire pour recueillir suffisamment de données (512 points) propres à une analyse des corrélations à long terme (Delignières et al., 2006).

## 2.4. Traitement des données

### 2.4.1. Calcul des séries de périodes et de phase relative

Les mouvements oscillatoires des pendules étaient enregistrés grâce au logiciel Labview et étaient ensuite traités sous Matlab pour obtenir les séries temporelles de périodes et de phase relative. Une fonction détectait les pics des séries après lissage de celles-ci, puis calculait les durées entre chaque pics, ce qui nous fournissait les séries de périodes pour chaque sujet. La phase relative était ensuite facilement calculée de la manière suivante :

$$\Phi_i = (\omega_i / T_i) * 360 \quad (2)$$

où  $\omega$  correspond à la différence temporelle entre le pic d'un sujet et le pic du partenaire et  $T$  correspond à la période du sujet de droite.

Nous obtenions donc :

- les séries de périodes de pendule de chaque sujet dans toutes les conditions
- les séries de phases relatives des pendules dans les 3 conditions « couplé »

Après élimination des 10 premières valeurs en raison de la mise en synchronisation des sujets, on conservait les 512 premières valeurs recueillies pour les analyses.

### 2.4.2. Analyses classiques de la moyenne et de la variabilité

Les moyennes et les écarts-types ont été calculés pour chaque série temporelle puis moyennés pour chaque condition expérimentale. Les moyennes des séries de phase relative devraient être égales à  $0^\circ$  dans le cas d'une synchronisation en phase parfaitement réalisée. La variabilité a été « décomposée » en deux composantes : la variance locale et les corrélations sérielles (Torre & Balasubramaniam, in press). La variance locale est censée représenter la mesure de l'amplitude de la variabilité, et les corrélations sérielles représentent l'organisation temporelle des événements de la série.

Bien que la variabilité globale du comportement soit co-déterminée par la variance locale et les corrélations sérielles, ces deux processus sont par nature indépendants, si bien que des séries temporelles présentant les mêmes exposants fractals peuvent présenter des variances locale différentes et inversement.

#### 2.4.3. Calcul de la variance locale

Nous avons déterminé la variance locale comme l'écart-type de la série des incréments  $I_i$  (*i.e.*, la série différenciée) qui composent la série originale  $X_i$ . L'avantage de la variance locale est qu'elle fournit un indice de l'amplitude des variations locales, indépendamment des fluctuations produites par les corrélations sérielles.

#### 2.4.4. Estimation des exposants fractals

*Detrended Fluctuation Analysis* (DFA, Peng et al., 1993)

Cette méthode consiste dans un premier temps à intégrer la série  $y(t)$ , en calculant pour chaque  $t$  la somme cumulée des écarts à la moyenne:

$$Y(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - \bar{y}] \quad (3)$$

Cette série intégrée est divisée en intervalles contigus de longueur  $n$ . A l'intérieur de chaque intervalle, une droite des moindres carrés est calculée, représentant la tendance locale dans l'intervalle. La série  $Y(t)$  est alors redressée en retranchant à chaque valeur  $Y(k)$  la valeur théorique  $Y_{th}(k)$  donnée par la régression. Pour chaque longueur d'intervalle  $n$ , la grandeur caractéristique des fluctuations est calculée par:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [Y(k) - Y_{th}(k)]^2} \quad (4)$$

Ce calcul est répété pour toutes les longueurs d'intervalles possibles.  $F(n)$  est lié à  $n$  par une loi puissance :

$$F(n) \propto n^\alpha \quad (5)$$

$\alpha$  est l'exposant d'échelle, estimé par la pente du graphe  $F(n)$  en fonction de  $n$  en coordonnées bi-logarithmique. Une valeur  $\alpha$  de 0.5 est caractéristique du bruit blanc gaussien,  $\alpha$  compris entre 0.5 et 1 indique des corrélations persistantes (une

augmentation dans la série aura tendance à être suivie d'une augmentation) et  $\alpha$  inférieur à 0.5 des corrélations anti-persistantes (une augmentation dans la série aura tendance à être suivie d'une diminution).

*Signal Summation Conversion method* (SSC, Eke et al., 2000 ; Hartmann et al., submitted)

Cette méthode est algorithmiquement proche de la DFA. Elle consiste dans un premier temps à intégrer la série originale. La série intégrée  $x(t)$  est ensuite divisée en intervalles contigus de longueur  $n$ , puis l'écart-type ( $SD$ ) de chaque intervalle est calculé selon la formule :

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x(t) - \bar{x}]^2}{n - 1}} \quad (6)$$

où  $\bar{x}$  est la moyenne de chaque intervalle. La moyenne des écarts-types ( $\overline{SD}$ ) de tous les intervalles est calculée, puis ce calcul est répété pour tous les intervalles de longueur  $n$  possibles (pour une série de  $N$  points :  $10 < n < N/2$ ). L'écart-type est relié à la taille de la fenêtre d'observation par une loi puissance :

$$\overline{SD} = n^\alpha \quad (7)$$

où  $\alpha$  est estimé comme la pente du graphe de  $\overline{SD}$  en fonction de  $n$  en coordonnée bi-logarithmique. Cette méthode est une adaptation des méthodes proposées par Cannon et al. (1997). Ces auteurs ont montré qu'un redressement de la série à l'intérieur de chaque intervalle avant le calcul de l'écart-type donne de meilleures estimations de l'exposant, et particulièrement pour les séries courtes. Dans ce travail nous avons utilisé la *bridge detrended scaled windowed variance method* (*bdSWV*) : une droite reliant les points extrêmes de chaque intervalle est retranchée à chaque donnée avant le calcul de l'écart-type.

#### 2.4.5. Comparaison inter-conditions

A partir des séries de périodes, des ANOVA 4 (Conditions) à mesures répétées ont permis d'évaluer l'effet des conditions expérimentales sur les moyennes, les variances globales, les variances locales et les coefficients  $\alpha$  issus de la DFA et de la

SSC. A partir des séries de phase relative des ANOVA 3 (Conditions) à mesures répétées ont permis d'évaluer l'effet de la force du couplage sur les moyennes, les variances globales, les variances locales et les coefficients  $\alpha$  issus de la DFA et de la SCC.

Nous avons calculé sur les séries de périodes la différence (en valeur absolue) de l'exposant  $\alpha$ -DFA et l'exposant  $\alpha$ -SSC entre les sujets d'un même couple dans les 4 conditions. Si les structures temporelles produites par les sujets d'un même couple tendent à s'homogénéiser on devrait observer sur les différences d'exposants fractals des valeurs proches de zéro. Des ANOVA 4 (Conditions) à mesures répétées ont permis de vérifier s'il existait un effet des conditions expérimentales sur la différence d'exposant.

Nous avons calculé les coefficients de corrélations entre les sujets d'un même couple sur les moyennes, les variances globales, les variances locales et sur les exposants fractals. Si les sujets adoptent exactement le même comportement à tout point de vue alors les coefficients de corrélations devraient tous être proches de 1 pour toutes les variables dans toutes les conditions « couplé ». Cependant nous avons fait l'hypothèse que seule la structure temporelle tendait à s'homogénéiser avec le couplage.

Nous avons également vérifié s'il existait une corrélation entre la variance locale et les corrélations sérielles des séries de périodes dans les quatre conditions. Les deux processus ne faisant pas appel aux mêmes propriétés du signal on s'attend à ne trouver aucune corrélation significative.

Le seuil de significativité a été fixé à  $p < 0.05$  pour tous les tests. Des tests post-hoc LSD ont été menés pour localiser les effets.

### **3. Résultats**

Les valeurs des moyennes, des variances globales, des variances locales ainsi que les valeurs des exposants  $\alpha$  dans chaque condition sont reportés dans le tableau 1.

#### **3.1. Moyennes et variabilités**

On observe un effet significatif des conditions expérimentales sur les moyennes des séries de périodes ( $F(3, 21) = 23.49, p < 0.001$ ) ; la moyenne en condition « solo » est

significativement plus grande que les moyennes en conditions « couplé » ( $p < 0.001$ ) et on observe une diminution significative entre les conditions « faible » et « forte » ( $p < 0.01$ ). On n'observe pas d'effet significatif des conditions expérimentales sur les moyennes des séries de phase relative ( $F(2, 10) = 0.24$ ,  $p = 0.79$ ). Les valeurs obtenues proches de  $0^\circ$  confirment que les sujets oscillaient bien en phase dans les trois conditions.

On observe un effet significatif des conditions expérimentales sur la variance globale des séries de périodes ( $F(3, 21) = 4.07$ ,  $p < 0.01$ ). Les tests post-hoc LSD ont révélé une diminution significative en condition « moyen » par rapport aux conditions « solo » et « faible » ( $p < 0.05$ ). La variance globale des séries de phases relatives est également significativement différente entre les trois conditions « couplé » ( $F(2, 10) = 11.32$ ,  $p < 0.001$ ) ; les tests post-hoc LSD ont révélé que la variabilité diminuait en condition « moyen » et « fort » comparé à la condition « faible » ( $p < 0.01$ ).

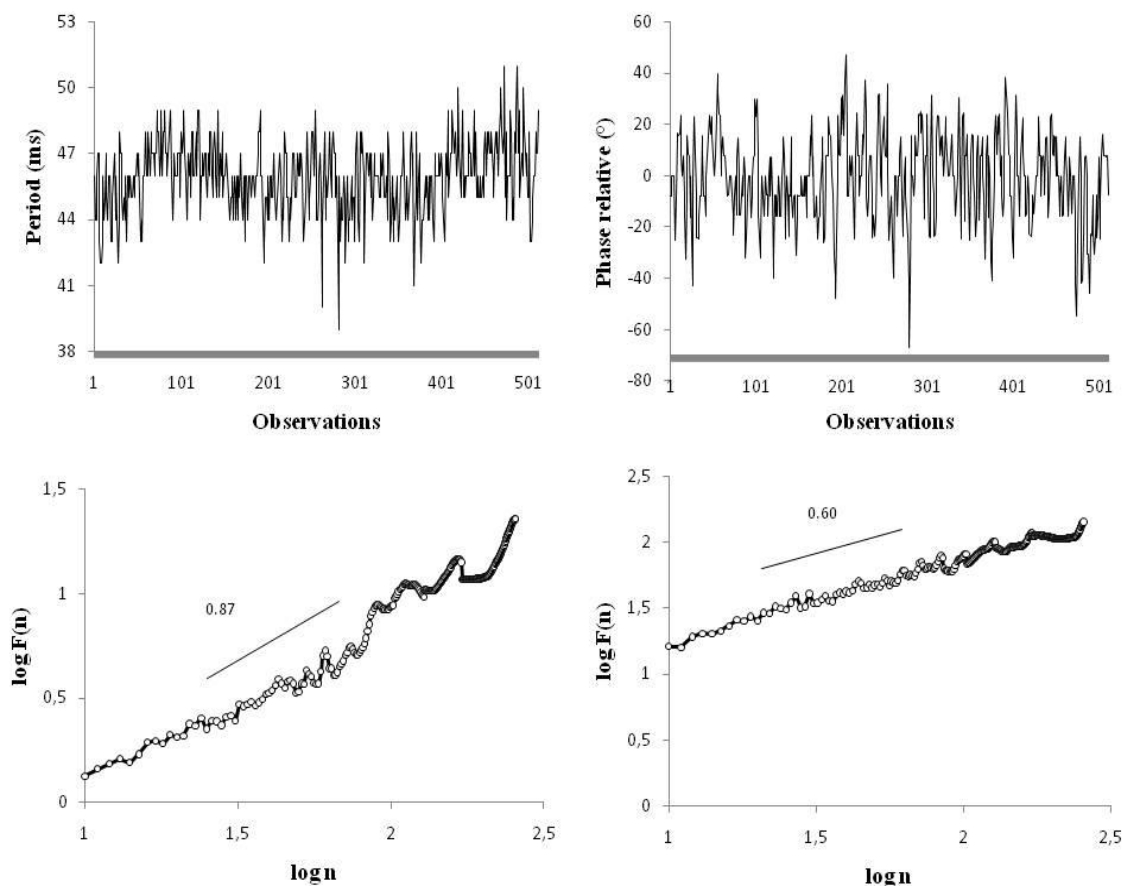


Figure 4 : exemple expérimental de séries (haut) de périodes (gauche) et de phases relatives (droite) recueillies en condition « moyen » et graphiques de DFA associé (bas).

Tableau 1 : Résultats moyens des analyses des séries temporelles (écarts-types en Italique) : moyennes des séries, écarts-types des séries, variance locale des séries, coefficients  $\alpha$ -DFA et  $\alpha$ -SSC

	Conditions expérimentales			
	Solo	Faible	Moyen	Fort
<b>Moyennes</b>				
Périodes (ms)	62.01 <i>7.04</i>	57.50 <i>7.08</i>	56.58 <i>6.87</i>	54.96 <i>5.24</i>
Phase relative (degrés)		-2.15 <i>8.64</i>	-1.67 <i>7.50</i>	-2.36 <i>7.15</i>
<b>Écarts-types</b>				
Périodes (ms)	2.36 <i>1.02</i>	2.27 <i>0.56</i>	1.88 <i>0.36</i>	2.01 <i>0.61</i>
Phase relative (degrés)		16.67 <i>4.56</i>	12.76 <i>4.74</i>	14.04 <i>3.17</i>
<b>Variances locales</b>				
Périodes (ms)	1.77 <i>0.47</i>	2.17 <i>0.37</i>	2.04 <i>0.47</i>	2.05 <i>0.38</i>
Phase relative (degrés)		15.39 <i>2.64</i>	13.61 <i>3.31</i>	14.93 <i>3.45</i>
<b><math>\alpha</math>-DFA</b>				
Périodes	1.03 <i>0.16</i>	1.03 <i>0.15</i>	0.99 <i>0.14</i>	1.04 <i>0.20</i>
Phase relative		0.65 <i>0.08</i>	0.62 <i>0.12</i>	0.64 <i>0.15</i>
<b><math>\alpha</math>-SSC</b>				
Périodes	1.06 <i>0.13</i>	1.03 <i>0.14</i>	1.01 <i>0.12</i>	1.04 <i>0.19</i>
Phase relative		0.68 <i>0.07</i>	0.64 <i>0.12</i>	0.65 <i>0.15</i>

On observe un effet significatif des conditions expérimentales sur la variance locale des séries de périodes ( $F(3, 21)=6.60, p<0.001$ ). Les tests post-hoc LSD ont révélé que la variance locale était significativement plus faible en condition « solo » comparé aux trois conditions « couplé » ( $p<0.01$ ). En revanche on n'observe pas d'effet significatif des conditions expérimentales sur la variance locale des séries de phase relative ( $F(2, 10)=2.08, p=0.15$ ).

### 3.2. Estimation des exposants fractals

On n'observe pas d'effet significatif des conditions expérimentales sur l'exposant  $\alpha$ -DFA ni dans les séries de périodes ( $F(3, 21)=0.41, p=0.75$ ) ni dans les séries de phases relatives ( $F(2, 10)=0.20, p=0.82$ ). On n'observe pas non plus d'effet significatif des conditions expérimentales sur l'exposant  $\alpha$ -SSC ni dans les séries de périodes ( $F(3, 21)=0.41, p=0.74$ ) ni dans les séries de phase relative ( $F(2, 10)=0.30, p=0.74$ ).

Les valeurs des différences d'exposant  $\alpha$ -DFA sur les séries de périodes sont égales à 0.16 ( $\pm 0.05$ ), 0.03 ( $\pm 0.03$ ), 0.02 ( $\pm 0.02$ ) et 0.03 ( $\pm 0.02$ ) respectivement pour les conditions « solo », « faible », « moyen » et « fort ». On observe un effet des conditions expérimentales sur les différences d'exposant  $\alpha$ -DFA sur les séries de périodes ( $F(3, 21)=57.24, p<0.001$ ) ; les tests post-hoc LSD révèlent que la différence d'exposant est significativement différente entre la condition « solo » et les trois conditions « couplé » ( $p<0.001$ ).

Les valeurs des différences d'exposant  $\alpha$ -SSC sur les séries de périodes sont égales à 0.14 ( $\pm 0.06$ ), 0.03 ( $\pm 0.03$ ), 0.03 ( $\pm 0.02$ ) et 0.03 ( $\pm 0.02$ ) respectivement pour les conditions « solo », « faible », « moyen » et « fort ». On observe un effet des conditions expérimentales sur les différences d'exposant  $\alpha$ -DFA sur les séries de périodes ( $F(3, 21)=23.24, p<0.001$ ) ; les tests post-hoc LSD révèlent que la différence d'exposant est significativement différente entre la condition « solo » et les trois conditions « couplé » ( $p<0.001$ ).

### 3.3. Corrélations

Les coefficients de corrélation entre les sujets d'un même couple sont reportés en tableau 2. On observe des corrélations significatives ( $p<0.05$ ) dans les trois conditions « couplé » pour les moyennes, les écarts-types et les  $\alpha$ -DFA et  $\alpha$ -SSC. Les coefficients sont égaux à 1 dans les trois conditions pour les moyennes, ils sont proches de 1 pour les coefficients  $\alpha$  (Figure 4) et légèrement inférieurs pour les écarts-types, notamment en condition « moyen » ( $r=0.79, p<0.05$ ). On observe une corrélation significative uniquement en condition « fort » pour la variance locale ( $r=0.61, p<0.05$ ).

Tableau 2 : Corrélations entre les variables des sujets d'un couple : moyennes, variance globale, variance locale, exposants  $\alpha$ -DFA et  $\alpha$ -SSC. (corrélation significative : \* :  $p < 0.05$  ; \*\*\* :  $p < 0.001$ ).

	Conditions expérimentales			
	Solo	Faible	Moyen	Fort
<b>Moyennes</b>	0.38	1.00***	1.00***	1.00***
<b>Écarts-types</b>	0.55	0.92***	0.79*	0.98***
<b>Variances locales</b>	0.29	-0.06	0.21	0.61*
<b><math>\alpha</math>-DFA</b>	0.47	0.97***	0.97***	0.99***
<b><math>\alpha</math>-SSC</b>	0.32	0.96***	0.96***	0.98***

Les coefficients de corrélation entre les variances locales et les corrélations sérielles dans les quatre conditions « solo », « faible », « moyen » et « fort » sont respectivement les suivants : -0.18, -0.43, 0.00 et 0.02. La corrélation est significative uniquement en condition « faible » ( $r = -0.43$ ,  $p < 0.05$ ).

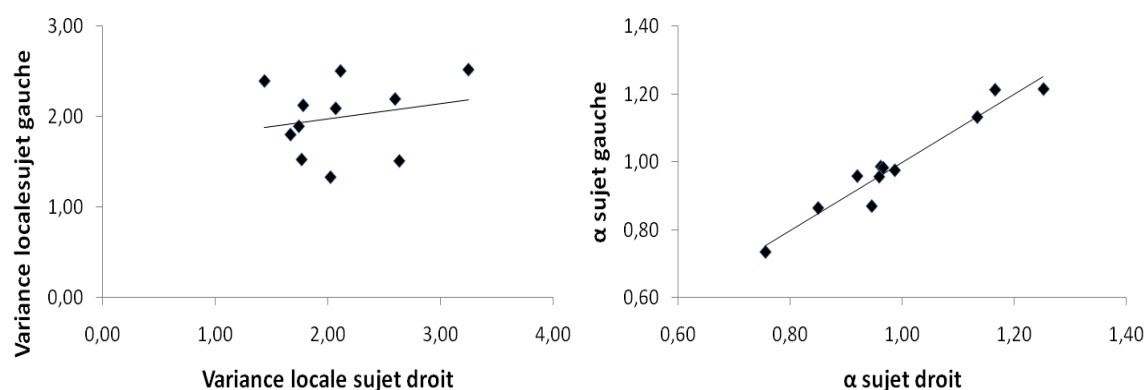


Figure 4 : corrélation entre les sujets manipulant le pendule avec la main droite et les sujets manipulant le pendule avec la main gauche sur les séries de périodes en condition « moyen » sur la variance locale (à gauche ;  $r = 0.21$ ,  $p = 0.53$ ) et les coefficients  $\alpha$ -DFA (à droite ;  $r = 0.97$ ,  $p < 0.001$ ).

#### 4. Discussion

Le but de cette étude était de mettre en évidence un rapprochement des structures temporelles produites par deux systèmes complexes couplés. Nous avons également émis l'hypothèse que la structure temporelle produite par le système formé des deux sujets tendrait à se complexifier à mesure que le couplage augmenterait. Nos résultats tendent à supporter la première hypothèse mais sont beaucoup plus ambigus concernant les séries de phase relative.

La consigne avait été donnée aux sujets de se coordonner en phase dans trois conditions : cette consigne a été respectée, en témoignent les valeurs des moyennes des séries de phase relative proche de  $0^\circ$  dans les trois conditions. Les sujets d'un couple faisaient osciller leur pendule à la même fréquence, et il est donc logique que les coefficients de corrélations entre deux sujets sur les moyennes des périodes soient égaux à 1 dans les trois conditions.

Les valeurs des exposants fractals des séries de phase relative sont inférieures à ceux observés pour les séries de périodes, se situant légèrement au-dessus de 0.60. Ce résultat est cohérent avec ceux obtenus par Torre et Delignières (2007), qui ont montré dans des tâches de coordination bimanuelles que les exposants fractals de phase relative sont toujours inférieurs aux exposants des séries de périodes produites par chaque effecteur. Les auteurs ont cependant montré que malgré la faiblesse des exposants, ces séries de phases relatives présentaient d'authentiques corrélations à long terme.

Comme nous l'avions prédit on peut observer une réduction de la variabilité des séries de périodes (en termes d'écart-type) lorsque les sujets se coordonnent. Il semble donc que le couplage permette une stabilisation du comportement individuel. On observe également une diminution de la variabilité des séries de phase relative avec l'accroissement de la force de couplage qui témoigne donc d'une stabilisation du comportement du système global formé par les deux sujets. Toutefois on peut noter que la variabilité en condition « fort » n'est pas différente de la variabilité en condition « moyen » à la fois dans les séries de périodes et dans les séries de phase relative. Ces résultats semblent donc indiquer que les conditions « moyen » et « fort » présenteraient en réalité la même force de couplage. Il est vrai que nous ne disposons pas de moyens d'évaluation quantitative de cette force de couplage, basée sur les retours perceptifs dont peuvent disposer les sujets. Notre travail s'est basé sur quelques études montrant

que la synchronisation des sujets semblait dépendante des feed-back disponibles dans l'environnement (Nessler & Gilliland, 2009 ; Zivotofsky & Hausdorff, 2007). L'absence de différences entre les deux conditions « moyen » et « fort » peut s'expliquer par la nature même des différences entre les deux tâches : la condition « fort » rajoute un couplage mécanique au couplage visuel et auditif ; or les sujets sont assis dans toutes les conditions, ils produisent donc peu d'oscillations posturales susceptibles d'influencer le partenaire dans la production de son mouvement. Les études citées précédemment se situaient dans un protocole de marche côte-à-côte, dans lequel les oscillations du corps dans le plan frontal seraient susceptibles d'influencer le partenaire.

Notre hypothèse selon laquelle l'augmentation de la force de couplage permettrait une augmentation des exposants fractals ne semble pas confirmée : on n'observe aucune différence significative entre les quatre conditions quelles que soit la méthode d'analyse (DFA ou SSC), ni sur les séries de périodes ni sur les séries de phase relative. Les systèmes semblent donc conserver le même « niveau de complexité » qu'ils agissent seuls ou qu'ils soient couplés avec un autre système, peu importe le nombre de retours perceptifs dont ils peuvent disposer. Dans les trois conditions « couplé » les sujets disposaient d'au-moins un retour perceptif visuel (vision périphérique en condition « faible ») pour maintenir la coordination en phase : on pourrait penser que les conditions expérimentales mises en place dans notre étude n'étaient pas assez différentes les unes des autres pour qu'on observe un effet sur les variables. Toutefois les résultats portant sur les écarts-types, qui montrent une diminution de la variabilité de la phase relative entre la condition « faible » et les conditions « moyen » et « fort », et les résultats des corrélations entre les variances locales des périodes des sujets d'un couple, qui montrent une corrélation significative uniquement en condition « fort », nous prouvent qu'il existe bien des effets localisés des conditions expérimentales sur certaines variables. Il convient donc d'étudier cette « stationnarité » de la complexité au regard des résultats portant sur les autres variables.

Nous avons proposé de décomposer la variabilité en variance locale, représentant la valeur des incréments, et en corrélations sérielles, représentant l'organisation temporelle des événements (Torre & Balasubramaniam, in press). L'évolution de la variance locale semble être inversée par rapport à la variabilité globale

en ce qui concerne les séries de périodes : la variance locale est minimale en condition « solo » et elle augmente dans les trois conditions « couplé ». Il convient de garder à l'esprit que variance locale et structure fractale sont deux processus qui, bien que de natures différentes, renvoient tous deux à la notion de variabilité dans les séries. En effet l'étude de l'écart-type nous renseigne uniquement sur la variabilité moyenne de la série étudiée, et passe sous silence la dynamique sous-jacente à la production des évènements. Mais différencier l'organisation des évènements et leur amplitude ne peut se faire directement à partir de la variance de la série : en effet il apparaît que les propriétés du bruit  $1/f$  peuvent affecter la variance globale des séries (Gilden, 2001 ; Madison, 2001). Le calcul de la variance locale permet de normaliser les fluctuations en différenciant la série originale et ainsi de retrouver des propriétés qui renvoient directement des informations sur l'amplitude des fluctuations, sans que la structure des évènements n'affecte la variable. On observe également dans notre étude une corrélation négative significative ( $r = -0.43$ ,  $p < 0.05$ ) entre l'exposant  $\alpha$ -DFA et la variance locale en condition « faible » uniquement.

Une façon d'interpréter nos résultats serait d'envisager la variance locale et les corrélations sérielles comme deux processus qui interagissent en permanence face aux perturbations : en se coordonnant, la variabilité globale des périodes diminue, la variabilité locale augmente et la structure temporelle reste (en moyenne) identique. Il semble alors que le système mette en place des stratégies afin de conserver un niveau minimal de variabilité : face à l'augmentation de la variabilité locale, c'est-à-dire à l'augmentation de l'amplitude des fluctuations, le système tente de conserver une structure temporelle qui permet d'adopter un comportement adaptatif optimal. L'observation isolée de l'une ou l'autre des variables ne peut nous renseigner totalement sur la dynamique des processus mis en œuvre par le système, et notre hypothèse d'une adaptation réciproque entre variance locale et corrélations sérielles permet d'expliquer des résultats a priori contradictoires. Ces hypothèses semblent en accord avec les résultats de Torre et Balasubramaniam (in press), qui montrent qu'en condition « critique » dans une tâche de coordination bimanuelle (antiphase à 90 % de la fréquence de transition) on observe une corrélation négative significative entre la variance locale et l'intensité des corrélations sérielles. Ces résultats poussent les auteurs à envisager que l'ajustement mutuel entre la variance locale et la structure des

corrélations dans les séries constitue un moyen potentiel pour le système de s'adapter en maintenant une variabilité globale optimale.

Notre étude avait principalement pour objectif de montrer un rapprochement des structures temporelles quand les sujets se coordonnent. Cette hypothèse se basait sur l'hypothèse de l'« effet d'harmonisation des complexités » proposée par West, Geneston et Grigolini (2008). Dans la mesure où les deux individus sont incités à coordonner mutuellement leurs mouvements (et notamment d'osciller en phase), il n'est guère surprenant que les variabilités tendent à s'homogénéiser en situation de couplage. C'est en effet ce qui est obtenu lorsque l'on analyse les écart-types des séries de périodes. Lorsque l'on décompose la variance globale en variance locale et corrélations sérielles, on se rend néanmoins compte que cette homogénéisation de la variance globale dépend essentiellement d'une homogénéisation des structures temporelles : alors que les variances locales restent non corrélées entre les deux participants en conditions de couplage (sauf dans la situation de couplage « fort », mais la corrélation reste alors relativement modérée), on observe une corrélation proche de 1.0 entre les structures temporelles des séries de périodes produites par les deux participants. Cette homogénéisation des structures temporelles pourrait être regardée comme la conséquence triviale du fait que les deux oscillateurs adoptent exactement le même comportement. On a vu cependant que la phase relative, bien que stationnaire, présente des fluctuations non négligeables au fil des essais, qui possèdent elles-mêmes des propriétés fractales. A noter également que les valeurs moyennes de la phase relative, proche de zéro, permettent de rejeter l'hypothèse selon laquelle l'un des participants se synchroniserait sur l'autre. Dans ce cas un décalage systématique serait observé, soit dans le sens de l'anticipation (un résultat couramment observé dans le tapping en synchronisation avec un métronome, voir Repp, 2005), soit en réaction. Nos résultats plaident davantage en faveur d'un couplage réciproque, bidirectionnel.

En d'autres termes, la synchronisation des deux oscillateurs reste imparfaite aux points de revirement, et les variances locales sont peu corrélées. Et malgré tout on observe un alignement parfait des structures temporelles. Dans la lignée des hypothèses développées en introduction, on peut suggérer que le couplage de deux systèmes passe par une homogénéisation de leurs complexités : deux systèmes amenés à dialoguer, à coopérer dans une tâche commune tendent à adopter des formes communes

d'organisation, de coordination interne de leurs composants. La concordance des structures temporelles révèle, au travers de la similarité des propriétés d'invariance d'échelle, cette harmonisation des complexités. Une argumentation similaire a été développée par Stephen et al. (2008), autour du concept de *strong anticipation*. Les systèmes couplés entretiennent alors une relation qui dépasse de simples adaptations locales, il ne s'agit plus seulement d'adaptations aux états mais bien d'une adaptation à la structure statistique globale du système partenaire.

## 5. Conclusion

Notre étude a permis de mettre en évidence que deux systèmes complexes harmonisaient leur structure temporelle en se couplant. Les outils d'analyses que nous avons utilisés s'intéressent à la structure temporelle des fluctuations produites par un système, et nous avons choisi de définir la complexité en se référant à cette structure, renvoyant la complexité au notion d'adaptabilité et d'organisation interne entre les composants du systèmes interagissant à de multiples échelles. Nos résultats semblent prouver qu'il suffit que les systèmes soient couplés, peu importe la force du couplage qui les lient, pour que leur structure temporelle s'harmonisent. Cette harmonisation des structures temporelles signifie que les systèmes s'adaptent l'un à l'autre en mettant en place des processus dynamiques semblables. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives dans l'étude de l'organisation interne des systèmes complexes et de leurs capacités d'adaptation. On peut par exemple imaginer transposer ce protocole dans une tâche de marche à pied, et ainsi étudier l'influencer d'un système sain sur un système âgé présentant une complexité « défaillante ».

## 6. Références

- Alvarez-Ramirez, J., Ibarra-Valdez, C., Rodriguez, E. & Dagdug, L. (2008).  $1/f$ -Noise structures in Pollocks's drip paintings. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387, 281-295.
- Bédard, C., Kroger, H. & Destexhe, A. (2006). Does the  $1/f$  frequency scaling of brain signals reflect self-organized critical states? *Physical Review Letters*, 97, 118102.

- Bressler, S.L., & Kelso, J. (2001). Cortical coordination dynamics and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 26–36.
- Cannon, M.J., Percival, D.B., Caccia, D.C., Raymond, G.M. & Bassingthwaite, J.B. (1997). Evaluating scaled windowed variance methods for estimating the Hurst coefficient of time series. *Physica A*, 241, 606-626.
- Chen, Y., Ding, M. & Kelso, J.A.S. (1997). Long memory processes ( $1/f^\alpha$  type) in human coordination. *Physical Review Letters*, 79, 4501-4504.
- Delignières, D., Lemoine, L. & Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23, 87-103.
- Delignières, D., Ramdani, S., Lemoine, L., Torre, K., Fortes, M. & Ninot, G. (2006). Fractal analysis for short time series: a reassessment of classical methods. *Journal of Mathematical Psychology*, 50, 525–544.
- Duarte, M. & Sternad, D. (2008). Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, 191, 265-276.
- Eke, A., Herman, P., Bassingthwaite, J.B., Raymond, G.M., Percival, D.B., Cannon, M., Balla, I., & Ikrényi, C. (2000). Physiological time series: distinguishing fractal noises from motions. *Pflügers Archives*, 439, 403-415.
- Gilden, D.L. (2001). Cognitive emissions of  $1/f$  noise. *Psychological Review*, 108, 33-56.
- Gilden, D.L., Thornton, T. & Mallon, M.W. (1995).  $1/f$  noise in human cognition. *Science*, 267, 1837-1839.
- Goldberger, A.L. (1999). Nonlinear dynamics, fractals and chaos theory: Implications for neuroautonomic heart control in health and disease. In C.L. Bolis and J. Licinio (Eds.), *The Autonomic Nervous System*. Genova: World Health Organization.
- Goldberger, A.L., Peng, C.K. & Lipsitz, L.A. (2002). What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease? *Neurobiology of Aging*, 23, 23-26.
- Hartmann, A., Kocsis, L., Herman, P. & Eke, A. (submitted). Online fractal signal processing in the time domain. *Physica A*.

- Hausdorff, J.M., Mitchell, S.L., Firtion, R., Peng, C.K., Cudkowicz, M.E., Wie, J.Y. & Goldberger, A.L. (1997). Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *Journal of Applied Physiology*, 82, 262-269.
- Hausdorff, J.M., Peng, C.K., Ladin, Z., Wei, J.Y. & Goldberger, A.R. (1995). Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *Journal of Applied Physiology*, 78, 349-358.
- Ihlen, E.A.F. & Vereijken, B. (in press). Beyond  $1/f^{\alpha}$  fluctuation in cognitive performance. *Journal of Experimental Psychology: General*.
- Issartel, J., Marin, L., & Cadopi, M. (2007). Unintended interpersonal co-ordination : « can we march to the beat of our own drum? ». *Neuroscience Letters*, 411, 174-179.
- Jennings, H.D., Ivanov, P.C., Martins, A.M., da Silva, P.C. & Viswanathan, G.M. (2004). Variance fluctuations in non-stationary time series: a comparative study of music genres. *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*, 336, 585-594.
- Jordan, K., Challis, J.H. & Newell, K.M. (2007). Walking speed influences on gait cycle variability. *Gait & Posture*, 26, 128-134.
- Kello, C.T., Anderson, G.G., Holden, J.G. & Van Orden, G.C. (2008). The pervasiveness of  $1/f$  scaling in speech reflects the metastable basis of cognition. *Cognitive Science*, 32, 1217-1231.
- Kello, C.T., Beltz, B.C., Holden, J.G. & Van Orden, G.C. (2007). The emergent coordination of cognitive function. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 551-568.
- Kelso, J.A.S. (1995). *Dynamics Patterns : The self-Organisation of Brain and Behavior*. Cambridge, Mass : MIT Press.
- Lagarde, J., Tognoli, E., & Kelso, J.A.S. (2006). How the brain recruits and binds segregated areas for the production of adaptive behavior: A multichannel EEG and behavioral study of multimodal coordination dynamics. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 28, S18-S19.
- Lipsitz L.A. & Goldberger A.L. (1992). Loss of "complexity" and aging: potential applications of fractals and chaos theory to senescence. *Journal of American Medicine association*, 267, 1806-9.

- Madison, G. (2001). *Functional modelling of the human timing mechanism*. Uppsala: Acta Universitatis Upsamiensis.
- Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Viesek, T., & Barabási, A.L. (2000). The sound of many hands clapping. *Nature*, *403*, 849-850.
- Nessler, J.A. & Gilliland, S.J. (2009). Interpersonal synchronization during side by side treadmill walking is influenced by leg length differential and altered sensory feedback. *Human Movement Science*, *28*, 772-785.
- Peng, C.K., Havlin, S., Stanley, H.E. & Goldberger, A.L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in non stationary heartbeat time series. *Chaos*, *5*, 82-87.
- Peng, C.K., Mietus, J., Hausdorff, J.M., Havlin, S., Stanley, H.E. & Goldberger, A.L. (1993). Long-range anti-correlations and non-Gaussian behavior of the heart-beat. *Physical Review Letter*, *70* (9), 1343-1346.
- Repp, B.H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*, 969-992.
- Richardson, M.J., Marsh, K.L., & Schmidt, R.C. (2005). Effects of visual and verbal information on unintentional interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *31*, 62-79.
- Richardson, M.J., Marsh, K.L., Isenhower, R., Goodman, J., & Schmidt, R.C. (2007). Rocking together : Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, *26*, 867-891.
- Schmidt, R.C., Carello, C., & Turvey, M.T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *16*, 227-247.
- Schmidt, R.C., Shaw, B.K., & Turvey, M.T. (1993). Coupling dynamics in interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *19*, 397-415.
- Schmidt, R.C., Christianson, N., Carello, C., & Baron, R. (1994). Effects of social and physical variables on between-person visual coordination. *Ecological Psychology*, *6*, 159-183.
- Schmidt, R.C. & O'Brien, B. (1997). Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, *9*, 189-206.

- Schmidt, R.C., Biennu, M., Fitzpatrick, P.A., & Amazeen, P.G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal coordination : Coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24, 884-900.
- Slifkin, A.B. & Newell, K.M. (1998). Is variability in human performance a reflection of system noise? *Current Directions in Psychological Science*, 7, 170-177.
- Shockley, K. D., Santana, M.V., & Fowler, C.A. (2003). Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 29, 326-332.
- Stephen, D.G., Stepp, N., Dixon, J. & Turvey, M.T. (2008). Strong anticipation: Sensitivity to long-range correlations in synchronization behavior. *Physica A*, 387, 5271-5278.
- Taylor, R.P., Micolich, A.P. & Jonas, D. (1999). Fractal analysis of Pollock's drip paintings. *Nature*, 399, 422-422.
- Torre, K. & Balasubramaniam, R. (in press). Disentangling stability, variability and adaptability in human performances: Focus on the interplay between local variance and serial correlation. *Journal of Applied Physiology*.
- Torre, K. & Delignières, D. (2008). Distinct ways of timing movements in bimanual coordination tasks: Contribution of serial correlation analysis and implications for modeling. *Acta Psychologica*, 129, 284-296.
- Torre, K., Delignières, D. & Lemoine, L. (2007).  $1/f^\beta$  fluctuations in bimanual coordination: An additional challenge for modeling. *Experimental Brain Research*, 183, 225-234.
- Turvey, M.T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science*, 26, 657-697.
- Vaillancourt, D.E. & Newell, K.M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiology of Aging*, 23, 1-11.
- Van Orden, G.C., Holden, J.C., & Turvey, M.T. (2003). Self-organization of cognitive performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 331-350.
- Van Orden, G.C., Holden, J.G. & Turvey, M.T. (2005). Human cognition and 1/f scaling. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134, 117-123.

- van Ulzen, N.R., Lamoth, C.J., Daffertshofer, A., Semin, G.R., & Beek, P.J. (2008). Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side. *Neuroscience Letters*, *432*, 88-93.
- Wagenmakers, E.J., Farrell, S., & Ratcliff, R. (2004). Estimation and interpretation of  $1/f\alpha$  noise in human cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *11*, 579–615.
- West, B.J., Geneston, E.L. & Grigolini P. (2008). Maximizing information exchange between complex networks, *Physics Reports*, *468*, 1-99.
- Zivotofsky, A.Z. & Hausdorff, J.M. (2007). The sensory feedback mechanisms enabling couples to walk synchronously : an initial investigation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, *4* , 28.

## Abstract

The main of this study is to analyze the evolution of the temporal structure of two complex systems which realize coordinated movements. Analyze of the temporal structure of a system can inform on the level of coordination between its constitutive elements on multiples scales. Healthy biological systems typically shows a  $1/f$ -noise structure, which means an optimal level of collaboration between components and could be the origin of their adaptability capacity. Some studies suggests that two systems communicate more easily if they share the same complexity, notably when their structure is  $1/f$ -noise like. We make the assumption that systems will show the same temporal structure when they coordinate, which mean an internal reorganization of the interactions. To test this hypothesis subjects manipulated hand-held pendulums and we have analyzed series with the DFA. Our results shows that fractals exponents matches between two coordinates subjects, suggesting an homogenization of the temporal structures of these two systems. This homogenization of the structures is possible if the system can reorganize its internal dynamics. This study shows the adaptation capacities of complex systems and asks on the dynamics of the underlying processes of these adaptations.

## Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la structure temporelle de deux systèmes complexes réalisant des mouvements coordonnés. L'analyse de la structure temporelle d'un système nous renseigne sur le degré de coordination entre ses éléments constitutifs à de multiples échelles. Les systèmes biologiques sains présentent une structure de type bruit  $1/f$ , qui traduit un degré optimal de collaboration entre leurs composants et qui pourrait être à l'origine de leur capacité d'adaptabilité. Certains travaux suggèrent que deux systèmes communiquent plus facilement s'ils partagent la même complexité, notamment lorsque leur structure présente du bruit  $1/f$ . Nous faisons l'hypothèse que des systèmes vont présenter la même structure temporelle lorsqu'ils se coordonnent, qui traduit une réorganisation interne des interactions. Pour tester cette hypothèse les sujets manipulaient des pendules manuels côte-à-côte et nous avons analysé les séries recueillies avec la DFA. Nos résultats montrent que les exposants fractals issus des analyses s'harmonisent entre deux sujets coordonnés, suggérant ainsi une homogénéisation des structures temporelles des deux systèmes. Cette harmonisation des structures n'a lieu que si le système est capable de réorganiser sa dynamique interne. Cette étude met en évidence les capacités d'adaptation des systèmes complexes et interroge la dynamique des processus sous-jacents à ces adaptations.