



Faculté des Sciences et Techniques
des Activités Physiques et Sportives



Mémoire de recherche présenté en vue de l'obtention du
Master Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
EOPS – APAS

parcours Sciences Technologie Mouvement

EuroMov Digital Health In Motion (EA 2991)

L'appariement des complexités, conditions d'émergence et
modélisation des processus

Présenté par

Antoine DUFOURNEAU

Sous la direction de

Didier DELIGNIERES (PU)

Juin 2022

Sommaire :

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | <i>Introduction</i> | 1 |
| 1.1. | <i>Systèmes complexes et synchronisation interpersonnelle</i> | 1 |
| 1.1.1. | <i>L'approche du traitement de l'information : la correction mutuelle des asynchronies</i> | 1 |
| 1.1.2. | <i>La perspective de la dynamique de coordination : le modèle des oscillateurs couplés</i> | 2 |
| 1.1.3. | <i>L'appariement des complexités</i> | 4 |
| 1.2. | <i>L'analyse de corrélations croisées sur fenêtres redressées (WDCC)</i> | 6 |
| 1.2.1. | <i>Correction mutuelle des asynchronies</i> | 6 |
| 1.2.2. | <i>Modèle des oscillateurs couplés</i> | 7 |
| 1.2.3. | <i>Appariement des complexités</i> | 8 |
| 1.3. | <i>La dynamique des processus de synchronisation</i> | 8 |
| 1.4. | <i>Une méthode d'analyse de l'évolution des modes de synchronisation</i> | 9 |
| 1.5. | <i>Hypothèses</i> | 11 |
| 2. | <i>Méthode</i> | 12 |
| 2.1. | <i>Participants</i> | 12 |
| 2.2. | <i>Tâche et procédure expérimentale</i> | 12 |
| 2.3. | <i>Mesures et collecte de données</i> | 13 |
| 2.4. | <i>Traitement des données</i> | 14 |
| 3. | <i>Résultats</i> | 14 |
| 4. | <i>Discussion</i> | 17 |
| 4.1. | <i>Hypothèses expérimentales</i> | 17 |
| 4.2. | <i>Alternance entre synchronisation immédiate et différée dans la tâche expérimentale</i> | 18 |
| 4.3. | <i>Alternance entre synchronisation immédiate et différée dans les modèles de synchronisation</i> | 20 |
| 4.4. | <i>La problématique de l'appariement des complexités</i> | 22 |
| 4.5. | <i>Plusieurs pistes d'optimisation de la restauration de la complexité</i> | 24 |
| 4.5.1. | <i>Le couplage des oscillateurs</i> | 24 |
| 4.5.2. | <i>La force du couplage</i> | 24 |
| 4.5.3. | <i>La marche, seule activité thérapeutique efficace ?</i> | 25 |
| 5. | <i>Conclusion</i> | 25 |
| 6. | <i>Références</i> | 26 |

1. Introduction.

1.1. Systèmes complexes et synchronisation interpersonnelle.

La synchronisation interpersonnelle, définie comme la coordination des évènements produits par plusieurs systèmes, représente un phénomène très régulièrement observable dans les activités de la vie quotidienne (par exemple, dans la marche, la danse, la musique). Les processus qui sous-tendent la synchronisation interpersonnelle restent cependant l'objet de débats, et différents cadres théoriques sont en concurrence pour en rendre compte.

Afin de mieux comprendre les processus d'émergence et les mécanismes qui les sous-tendent, il semble nécessaire de présenter les trois principaux cadres théoriques qui ont été proposés dans les travaux portant sur la synchronisation interpersonnelle.

1.1.1. L'approche du traitement de l'information : la correction mutuelle des asynchronies.

L'approche du traitement de l'information, présentée à l'origine dans les analyses de synchronisation sensorimotrice (SMS) lors de tâches de synchronisation de mouvements simples (i.e : tapes de l'index) avec un métronome régulier (Repp, 2005; Repp & Su, 2013), suggère que la synchronisation est fondée sur des processus d'anticipation cognitifs et représentationnels. En effet, de nombreuses études ont mis en évidence ce phénomène où les participants avaient tendance à corriger la tape actuelle sur la base de l'asynchronie réalisée à la tape précédente (Torre & Delignières, 2008; Vorberg & Wing, 1996). Le modèle est initialement formulé de la manière suivante :

$$I(n) = I^*(n) - \alpha A(n-1) + \gamma [B(n) - B(n-1)] \quad (1)$$

Où $I(n)$ correspond à l'intervalle inter-tapes produit par le participant à la $n^{\text{ième}}$ tape, $I^*(n)$ l'intervalle de temps produit par l'horloge interne de l'individu (« *internal timekeeper* »), $A(n)$ l'asynchronie entre la $n^{\text{ième}}$ tape et le $n^{\text{ième}}$ signal du métronome, et $B(n)$ représente un processus de bruit blanc, modélisant l'erreur produite par les composantes motrices à la $n^{\text{ième}}$ tape. Dans ce modèle, α représente l'ampleur de la correction de l'asynchronie précédente dans la tape actuelle. Initialement, l'horloge interne était conçue comme un processus de bruit blanc, produisant des intervalles fluctuant aléatoirement autour d'une valeur moyenne. Delignières et al. (2004) ont cependant montré que l'horloge interne produisait des fluctuations fractales, suggérant que cette horloge interne serait un système complexe.

Le paradigme de l'approche du traitement de l'information a été étendu à l'étude de la synchronisation avec des métronomes non-isochrones dans l'optique de mieux rendre compte de la synchronisation dans des environnements plus réalistes. Les premières études se sont concentrées sur des métronomes dont les déviations étaient régulièrement modulées autour du tempo de base (Madison, 2005). Un certain nombre d'études plus récentes ont analysé la synchronisation avec des métronomes présentant des variabilités fractales, censées reproduire plus fidèlement la variabilité des fluctuations rencontrées dans les situations naturelles et notamment avec des partenaires humains (Delignières & Marmelat, 2014; Kaipust et al., 2013). Ces travaux ont globalement confirmé que dans ce cas également, les individus maintenaient la synchronisation par des corrections discrètes, cycle-à-cycle, des asynchronies (Delignières et al., 2016).

Cette approche cognitive de la synchronisation sensorimotrice a été étendue à la synchronisation interpersonnelle, notamment dans des études de tâches de tapping en dyades (Konvalinka et al., 2010; Nowicki et al., 2013). Celles-ci ont également rapporté des résultats suggérant que la synchronisation était principalement régie par une correction mutuelle des asynchronies. Ainsi, le modèle a été étendu dans les tâches de tapping en synchronisation :

$$\begin{aligned} I_1(n) &= -A_1(n-1) + \gamma_1 [B_1(n) - B_1(n-1)] \\ I_2(n) &= I_2^*(n) - \alpha_2 A_2(n-1) + \gamma_2 [B_2(n) - B_2(n-1)] \end{aligned} \quad (2)$$

Où $I_1(n)$ et $I_2(n)$ représentent les intervalles inter-tapes produits par les participants 1 et 2, $I_1^*(n)$ et $I_2^*(n)$ les intervalles produits par leur horloges internes, $A_1(n)$ et $A_2(n)$ les asynchronies entre les tapes produites par les deux participants ($A_1(n) = -A_2(n)$), et $B_1(n)$ et $B_2(n)$ les termes d'erreurs. Ce modèle, typiquement cognitive, implique donc plusieurs processus représentationnels : des horloges internes, la perception des asynchronies, et leur correction différée.

1.1.2. *La perspective de la dynamique de coordination : le modèle des oscillateurs couplés.*

La perspective de la dynamique de coordination, initialement développée dans les analyses de coordinations bimanuelles, propose un second cadre théorique qu'est le modèle des oscillateurs couplés. Cette approche a produit un modèle phénoménologique basé sur l'hypothèse d'un couplage continu entre des oscillateurs auto-entretenus (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Schöner, Haken, & Kelso, 1986). Ce modèle s'est avéré rendre compte de manière pertinente de la majorité des caractéristiques empiriques des tâches de coordination bimanuelle

telles que la stabilité différentielle des modes de coordination en phase et en antiphase, ainsi que la transition de la coordination en antiphase à la coordination en phase avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation (Haken et al., 1985; Schöner et al., 1986).

Le modèle des oscillateurs couplés peut être formulé comme suit :

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \delta\dot{x}_1 + \lambda\dot{x}_1^3 + \gamma x_1^2 \dot{x}_1 + \omega_t^2 x_1 = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)[a + b(x_1 - x_2)^2] + q_1 \varepsilon_1 \\ \ddot{x}_2 + \delta\dot{x}_2 + \lambda\dot{x}_2^3 + \gamma x_2^2 \dot{x}_2 + \omega_t^2 x_2 = (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)[a + b(x_2 - x_1)^2] + q_2 \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3)$$

La partie gauche des équations correspond à la dynamique en cycle limite de chaque oscillateur (l'indexation renvoyant aux oscillateurs 1 et 2, x à la position des oscillateurs, et la notation pointée à la dérivation temporelle). γ , δ , et λ représentent les paramètres d'amortissement, et ω_t^2 le paramètre de raideur. Dans la formulation initiale du modèle, la raideur était supposée constante, mais Torre et Delignières (2008) montrent que pour rendre compte de manière plus réaliste les fluctuations de la coordination, le terme de raideur doit être doté de propriétés fractales. La partie droite renvoie à une fonction de couplage déterminée par les paramètres a et b , tendant à réduire en continu les écarts de position et de vitesse entre les deux oscillateurs. Enfin, ε_1 et ε_2 sont des processus de bruit blanc de force q_1 et q_2 , indiquant des perturbations aléatoires et continues affectant indépendamment chacun des oscillateurs. Le modèle suppose que le paramètre de raideur est le même pour chaque oscillateur et que les perturbations sont compensées par la fonction de couplage.

Ce modèle a été étendu aux synchronisations interpersonnelles, notamment par Schmidt et al. (1990), dans une étude où l'on demandait à deux participants, assis sur une table, de coordonner les mouvements d'oscillation de leurs jambes. Ce travail a montré que la coordination interpersonnelle présentait de fortes similitudes avec la coordination bimanuelle. Les coordinations en phase et en antiphase étaient des comportements intrinsèquement stables, l'antiphase étant cependant moins stable que la phase, et une transition du mode de coordination en antiphase à celui de la coordination en phase apparaissait spontanément à mesure que la fréquence oscillatoire augmentait.

D'autres tâches interpersonnelles ont présenté des résultats similaires, notamment dans l'étude de Richardson et al. (2007) où les participants devaient réaliser des balancements côte-à-côte sur des chaises à bascule ou encore dans l'étude de Schmidt et ses collaborateurs (1998) où les participants avaient pour instruction de coordonner des pendules par des mouvements oscillatoires. Certaines prédictions importantes ont été mises en évidence dans les tâches de

coordination interpersonnelle, telles que l'effet d'une différence entre les fréquences propres (i.e : rythmes préférentiels) des oscillateurs.

Contrairement au paradigme précédent, ce modèle repose sur un couplage continu, et ne suppose pas de corrections discrètes, cycle-à-cycle, des asynchronies. Si le modèle de correction mutuelle des asynchronies peut être qualifié de *synchronisation différée* (la synchronisation est réalisée au cycle $n+1$, sur la base des asynchronies perçues au cycle n), le modèle des oscillateurs couplés suppose une *synchronisation immédiate* entre les deux systèmes (la synchronisation étant réalisée au sein de chaque cycle).

1.1.3. L'appariement des complexités.

Le troisième cadre théorique proposant de rendre compte des processus de coordination interpersonnelle se nomme l'appariement des complexités (ou « *complexity matching* ») (Abney et al., 2014; Delignières & Marmelat, 2014; Marmelat & Delignières, 2012). Introduit initialement par West, Geneston, et Grigolini (2008), le concept d'appariement des complexités décrit un échange d'informations maximal entre deux systèmes complexes lorsque ceux-ci sont dotés d'un niveau de complexité similaire. Marmelat et Delignières (2012) proposent d'appliquer ce modèle à la synchronisation interpersonnelle, en montrant que deux systèmes en activité de synchronisation tendent à harmoniser leurs complexités.

Stephen et Dixon (2011) présentent cette forme de synchronisation comme un cas de dynamique de cascade multifractale dans laquelle les fluctuations perceptivo-motrices seraient coordonnées sur plusieurs échelles temporelles. De ce point de vue, cette coordination entre les différentes échelles de temps pourrait soutenir les aspects prédictifs du comportement sans nécessiter de modèle interne. Mahmoodi, West, et Grigolini (2017, 2018) ont montré l'importance des « événements cruciaux » dans le transport des informations d'un système complexe à un autre. La complexité des événements cruciaux est définie par la fonction de densité de probabilité (PDF) du temps d'attente des intervalles entre des événements cruciaux consécutifs, avec une loi puissance inverse (IPL), caractérisée par un exposant μ ($1 < \mu < 3$). La plus grande complexité représente une fluctuation en $1/f$ correspondant à $\mu = 2$, et lorsque $\mu = 3$, la complexité est plus faible et cela peut être interprété comme la présence de pathologies ou de vieillissement dans un système (Mahmoodi, West, & Grigolini, 2020). Les auteurs ont élaboré une théorie selon laquelle lorsque deux systèmes d'un niveau de complexité différents interagissent (par exemple, une personne âgée avec un jeune adulte), le système le moins

complexe serait attiré par le système le plus complexe, avec une augmentation de la complexité du premier.

L'appariement des complexités correspondrait ainsi à un transfert de multifractalité entre les systèmes complexes, où le système le plus complexe fournirait des informations au système le moins complexe (Mahmoodi, West, & Grigolini, 2017). Cette hypothèse a été testée avec succès par Almurad et al. (2018) qui ont montré qu'en faisant marcher bras-dessus-bras-dessous une jeune adulte avec une personne âgée, la complexité de cette dernière se trouvait en partie restaurée après 3 semaines d'entraînement, et que cette restauration perdurait dans un post-test réalisé deux semaines post-protocole. Ce résultat a été confirmé par Ezzina et al. (2021b), avec une pérennité de la restauration deux mois après la fin du protocole.

Le modèle d'appariement des complexités suppose comme le précédent modèle, une synchronisation immédiate entre les deux systèmes, sous-tendue par la coordination multi-échelles entre les deux systèmes. Roume et al. (2018) en proposent une expression simplifiée :

$$\begin{aligned} I_1(n) &= I^*_1(n) + \gamma_1 B_1(n) \\ I_2(n) &= I^*_2(n) + \gamma_2 B_2(n) \end{aligned} \tag{4}$$

Où, $I^*_1(n)$ et $I^*_2(n)$ correspondent à deux « horloges internes », modélisées comme deux séries fractales corrélées à long-terme (le niveau de corrélation dépendant du degré d'appariement).

En somme, ces trois paradigmes théoriques sont largement soutenus dans leurs domaines respectifs et pourraient fournir des hypothèses satisfaisantes dans des tâches spécifiques. L'approche du traitement de l'information semble pertinente pour rendre compte des tâches de synchronisation discrète, avec une correction au pas-à-pas des asynchronies (Konvalinka et al., 2010). La perspective de la dynamique de coordination semble intéressante pour les mouvements continus et oscillatoires (Schmidt et al., 1990), et l'appariement des complexités serait plutôt exploité dans des situations complexes, proches des situations de la vie réelle (Abney et al., 2014; Almurad et al., 2017). Néanmoins, la distinction entre ces trois cadres n'est pas toujours évidente et il n'est pas improbable que la synchronisation interpersonnelle puisse être expliquée de manière simultanée par plusieurs modèles. Almurad et al. (2018) montrent par exemple que si la synchronisation de la marche bras-dessus-bras-dessous est majoritairement réalisée par des processus de synchronisation immédiate, on observe en simultané la présence de corrections discrètes des asynchronies.

Il est possible de distinguer ces paradigmes théoriques au travers de l'analyse de corrélations croisées sur fenêtres redressées (WDCC). Cet algorithme permet d'identifier les processus qui sous-tendent les différentes formes de coordinations interpersonnelles.

1.2. *L'analyse de corrélations croisées sur fenêtres redressées (WDCC).*

L'analyse fenêtrée des corrélations croisées, développée initialement par Konvalinka et al. (2010), consiste à analyser ces corrélations sur une fenêtre restreinte, et de répéter l'analyse tout au long des séries, en faisant progressivement glisser l'intervalle considéré. Les fonctions de cross-corrélation sont ensuite moyennées point par point, débouchant sur une fonction moyenne de cross-corrélation.

Delignières et Marmelat (2014), suite à l'observation de fluctuations en $1/f$ dans les séries comportementales, considéraient que les tendances locales dans ce type de processus pouvaient affecter les corrélations croisées et fausser les valeurs obtenues. Ils ont proposé d'ajouter une procédure de redressement des séries (on retire la tendance linéaire dans chaque intervalle considéré comme le calcul de la fonction de corrélation croisée). Cette analyse est dénommée *Windowed Detrended Fluctuation Analysis* (WDCC ; Roume et al., 2018). Elle fonctionne sur des fenêtres de 15 points, les cross-corrélations sont calculées du décalage -10 au décalage +10, et la fenêtre de calcul est glissée point par point.

Roume et al. (2018) ont proposé une analyse formelle de ces fonctions de cross-corrélations fenêtrées, et ont dérivé analytiquement les résultats attendus des trois modes de synchronisation précédemment décrits.

1.2.1. *Correction mutuelle des asynchronies.*

Le modèle de correction mutuelle des asynchronies (Eq. 2) produit typiquement des corrélations croisées positives au décalage -1 et +1, reflétant la correction des asynchronies et la volonté de s'adapter à l'intervalle inter-tape de l'autre participant (Fig. 1). La corrélation croisée au décalage 0 est typiquement négative, un phénomène résultant mécaniquement de la correction mutuelle des asynchronies et de l'indépendance des *timekeepers* (Roume et al., 2018). A noter que des pics positifs supplémentaires peuvent apparaître, par exemple aux décalages -2 et +2, indiquant que la correction d'une asynchronie n'est pas uniquement réalisée sur le cycle suivant, mais sur deux cycles successifs (Marmelat & Delignières, 2012). Il est enfin possible au travers de ces résultats de distinguer dans la synchronisation un meneur et un suiveur, le meneur étant censé représenter un pic de correction inférieur à celui du suiveur (Roume et al., 2018).

Ce pattern spécifique de correction mutuelle des asynchronies a été mis en évidence dans l'étude de Konvalinka et ses collaborateurs (2010) dans une tâche de tapping en synchronie, dans l'étude menée par Ezzina et al. (2021a) également dans une tâche de tapping ainsi que dans le travail de Marmelat et Delignières (2012) où les participants devaient balancer de manière synchronisée des pendules manuelles.

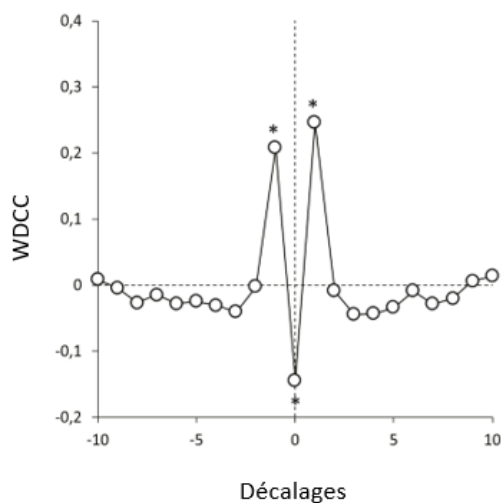


Figure 1 : Fonction WDCC pour le modèle de correction mutuelle des asynchronies (* $p < 0.05$).

1.2.2. *Modèle des oscillateurs couplés.*

Le modèle des oscillateurs couplés produit un pic positif élevé au décalage 0 (Fig. 2), suggérant la présence d'un couplage local et continu à l'intérieur du cycle limite où les oscillateurs synchronisent nettement leurs fréquences. Ce pic positif est la signature typique de la synchronisation immédiate. Les coefficients de cross-corrélations rejoignent des valeurs proches de 0 sur tous les autres décalages.

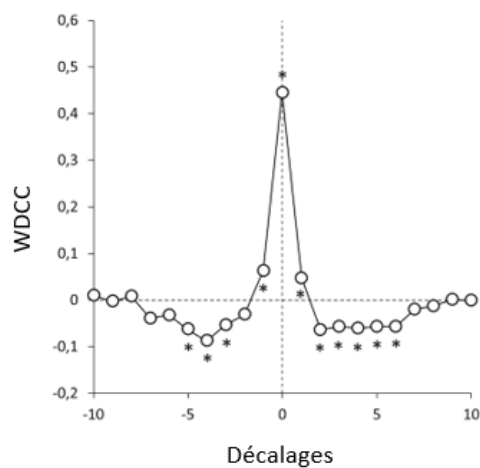


Figure 2 : Fonction WDCC pour le modèle des oscillateurs couplés (* $p < 0.05$).

1.2.3. Appariement des complexités.

Le modèle de l'appariement des complexités présente également un pic positif au décalage 0. Il est cependant moins élevé que celui observé dans les séries produites par le modèle des oscillateurs couplés, et sa valeur dépend du degré de cross-corrélation induit entre les deux systèmes (Fig. 3). Ce type de fonction de cross-corrélation a été trouvé dans l'étude de Almurad et al. (2018), et lorsqu'une personne âgée marchait bras-dessus-bras-dessus avec une jeune adulte, on obtenait un pic positif au décalage 0 plus élevé que lorsque les personnes marchaient côte-à-côte sans contact physique. Ce résultat supposait que la force de couplage favorisait l'appariement des complexités.

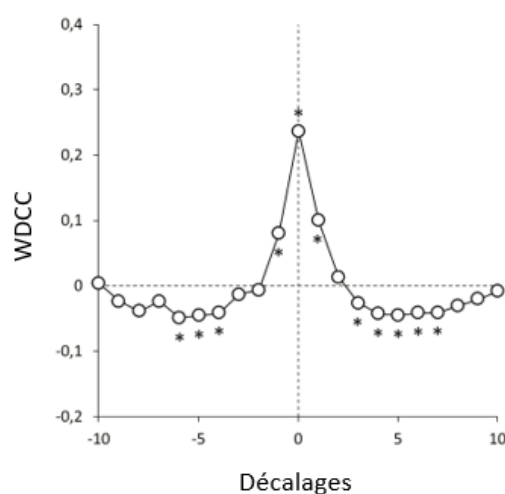


Figure 3 : Fonction WDCC pour le modèle de l'appariement des complexités (* $p < 0.05$).

1.3. La dynamique des processus de synchronisation.

La WDCC ne rend compte que d'une moyenne de la fonction de corrélation croisée, et suggère donc que le processus de synchronisation est invariant tout au long de la période d'observation. Cependant, une analyse de l'évolution des patterns de cross-corrélation au cours d'une séquence expérimentale suggère que cette invariance est loin d'être effective.

La Figure 4 illustre l'évolution, sur deux pas consécutifs, des cross-corrélations de décalage -1, 0, et +1 entre les séries produites par deux participants dans la condition bras-dessus-bras-dessous de l'étude de Almurad et al. (2018). Nous pouvons observer dans le rectangle rouge une phase de synchronisation immédiate avec un décalage 0 proche de 0.8 (renvoyant au modèle des oscillateurs couplés), une phase dans le rectangle vert où le décalage 0 est presque nul avec un décalage +1 proche de 0.6, signifiant une correction de l'asynchronie de la part du deuxième sujet, et dans le rectangle noir une phase de correction des asynchronies de la part des deux sujets avec un décalage 0 qui devient négatif.

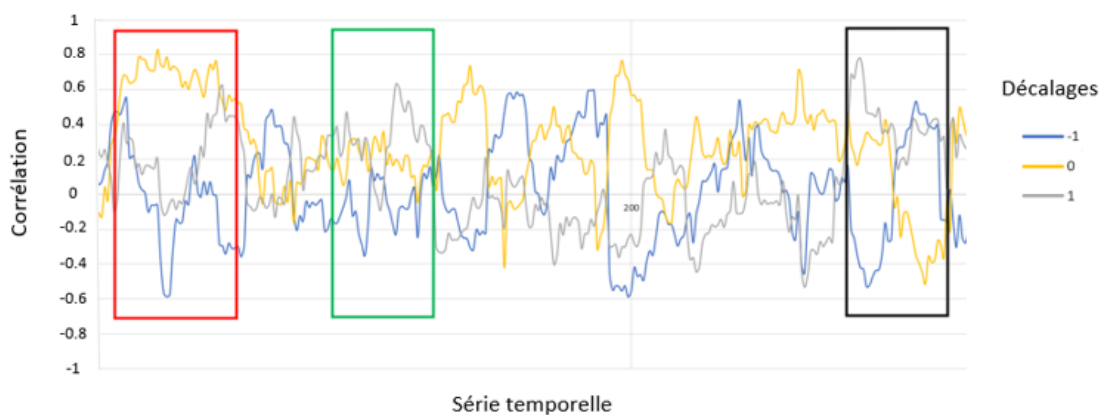


Figure 4 : Evolutions des patterns de cross-corrélations de décalage -1 (en bleu), 0 (en jaune), et +1 (en gris) dans l'étude de marche synchronisée condition bras-dessus-bras-dessous lors de la 2^{ème} session de la 4^{ème} semaine (Almurad et al., 2018).

Ces observations suggèrent que la synchronisation n'est pas homogène au fil du temps, et qu'elle présente plusieurs alternances entre les différentes formes de synchronisation.

1.4. Une méthode d'analyse de l'évolution des modes de synchronisation.

Il nous semble nécessaire, plutôt que de caractériser le comportement moyen de synchronisation, d'essayer de quantifier ces différentes époques de synchronisation en mesurant leur longueur moyenne ainsi que leur stabilité relative. Nous pensons que mesurer les longueurs moyennes des époques de synchronisation serait une méthode pertinente puisqu'elle permettrait de rendre compte des signatures typiques des modes de synchronisation ainsi que de leur constance dans les séries temporelles.

Cette méthode trouve son origine dans un travail publié par Boker et al. (2002), qui avaient envisagé de rendre compte de l'évolution des fonctions de cross-corrélation au cours du temps. Plutôt que de moyenner les fonctions de cross-corrélation produites par la WDCC, nous allons donc essayer de décrire leur évolution au cours d'une séquence expérimentale de synchronisation interpersonnelle. Cette méthode que l'on a appelé WDCC glissante, est basée sur l'algorithme de la WDCC, mais se focalise sur les cross-corrélations de décalages -2, -1, 0, +1 et +2, qui, comme vu précédemment, concentrent les différences entre les divers modes de coordination.

Afin de distinguer les différentes formes de synchronisation au sein d'une même série, nous avons établi des critères pour les décalages étudiés, de sorte à assigner à chaque fenêtre d'intervalle un mode de synchronisation dominant. Nous avons considéré que la synchronisation immédiate était dominante lorsque la cross-corrélation de décalage 0 était supérieure à 0.2 et supérieure à toutes les valeurs des autres décalages dans la même fenêtre.

Pour la synchronisation différée de décalage 1, les cross-corrélations de décalages -1 et +1 devaient être supérieures à 0.1 et supérieures à tous les autres décalages. Une règle similaire nous a permis de caractériser la synchronisation différée de décalage 2.

L'ensemble de ces critères a permis de construire un système de classification, permettant de déterminer quel type de synchronisation dominait sur chaque fenêtre. Nous avons considéré qu'une période de synchronisation était stable lorsque le même type de synchronisation était dominant sur au moins 5 fenêtres successives.

Nous avons ainsi déterminé deux indicateurs statistiques :

- La longueur moyenne des époques d'exploitation de chaque mode de coordination (synchronisation immédiate de décalage 0, synchronisation différée de décalage 1, et synchronisation différée de décalage 2).
- Le pourcentage de cycles exploitant ces trois modes de synchronisation, dans l'ensemble de la série.

Dans le tableau ci-dessous, nous rendons compte de l'application de cette méthode sur un certain nombre de séries collectées dans des expérimentations précédentes :

- Une séquence de marche bras-dessus-bras-dessous collectée lors de l'étude de Almurad et al. (2018), série issue de la 2^{ème} session de la 4^{ème} semaine.
- Des séries collectées lors de l'expérimentation de Marmelat et Delignières (2012), dans laquelle les participants, assis côte à côte, devaient synchroniser les oscillations de pendules, dans trois conditions de couplage (fort, normal, faible).
- Des séries collectées dans l'expérimentation menée par Ezzina et al. (2021a) dans laquelle les participants, face à face, devaient synchroniser des séries de tapes de l'index, ou des séries d'oscillations de joysticks.

Les résultats présentés dans le Tableau 1 montrent que pour l'étude de marche synchronisée (Almurad et al., 2018), la longueur moyenne des époques de synchronisation immédiate est inférieure à celles des époques de synchronisation différée de décalages 1 et 2 et ne représente seulement que 32.19% de la synchronisation totale. La synchronisation immédiate, bien que semblant dominer la coordination au regard de la WDCC (Fig. 3), est en fait concurrencée par des époques importantes de synchronisation différée, avec des longueurs moyennes conséquentes (17.89 points pour la synchronisation différée aux décalages 1, 16.34 points pour la synchronisation différée aux décalages 2, contre 16.09 pour la synchronisation immédiate).

Dans les expérimentations de Marmelat et Delignières (2012) et de Ezzina et al. (2021a), on trouve également une proportion importante de correction des asynchronies : la synchronisation différée aux décalages 1 ou 2 est présente dans 90.05% des cycles dans l'étude de Marmelat et Delignières (2012), et à 84.38% dans celle de Ezzina et al. (2021a).

Tableau 1 : Longueurs moyennes et pourcentages des époques de synchronisation immédiate de décalage 0, et de synchronisation différée de décalage 1 et 2, dans les études de marche bras-dessus-bras-dessous (Almurad et al., 2018), d'oscillations pendulaires avec couplage fort, normal et faible (Marmelat & Delignières, 2012), et de tapping et d'oscillation en condition de pleine interaction (« full ») (Ezzina et al., 2021a).

| | Longueur moyenne décalage 0 | Longueur moyenne décalages 1 | Longueur moyenne décalages 2 | Pourcentage décalage 0 | Pourcentage décalages 1 | Pourcentage décalages 2 |
|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Almurad et al. (2018) – Marche bras-dessus-bras-dessous | 16.09 | 17.89 | 16.34 | 32.19 | 35.94 | 31.87 |
| Marmelat & Delignières (2012) – Oscillation couplage fort | 5.45 | 21.84 | 18.44 | 12.10 | 47.80 | 40.10 |
| Marmelat & Delignières (2012) – Oscillation couplage normal | 5.00 | 29.83 | 16.01 | 10.28 | 56.77 | 32.95 |
| Marmelat & Delignières (2012) – Oscillation couplage faible | 3.40 | 21.55 | 21.32 | 7.47 | 46.19 | 46.34 |
| Ezzina et al. (2021a) – Tapping full | 7.72 | 34.01 | 15.67 | 13.98 | 58.64 | 27.38 |
| Ezzina et al. (2021a) – Oscillation full | 7.69 | 22.59 | 15.06 | 17.27 | 49.85 | 32.88 |

Ces résultats suggèrent clairement l'existence d'une alternance entre plusieurs formes de synchronisation au sein d'une même série. Ils expliquent également que les signatures typiques des formes de synchronisation sont différentes en fonction des tâches proposées. La synchronisation immédiate est plus importante lorsque les individus réalisent une activité naturelle telle que la marche (Almurad et al., 2018), et la synchronisation différée, aux décalages 1 et 2, est plus dominante lorsque les individus effectuent des tâches de laboratoire, telles que le tapping ou des mouvements oscillatoires (Ezzina et al., 2021a; Marmelat & Delignières, 2012).

1.5. Hypothèses.

L'objectif de notre étude sera de vérifier cette hypothèse en proposant une tâche censée reproduire une alternance entre les différents modes de synchronisation (immédiate et différée aux décalages 1 et 2). Nous avons choisi d'utiliser une tâche de synchronisation interpersonnelle d'oscillations de la jambe droite, similaire à celle proposée par Schmidt et al. (1990). Comme

il a été dit précédemment, cette expérimentation avait été historiquement importante pour l'extension du modèle des oscillateurs couplés aux coordinations interpersonnelles. D'un autre côté, nous avons vu que des expérimentations recourant à des mouvements oscillatoires, typiques du paradigme des oscillateurs couplés, révélaient une part importante de synchronisation différée (Ezzina et al., 2021a; Marmelat & Delignières, 2012).

Nous proposerons également plusieurs conditions dans notre tâche, supposées affecter le couplage physique, mécanique et informationnel, entre les deux participants. Nous essaierons ainsi de vérifier les résultats de Almurad et al. (2018) et Ezzina et al. (2021b) qui suggèrent que la force du couplage favorise la synchronisation immédiate.

Nous supposons que la longueur moyenne des époques de synchronisation immédiate sera plus élevée en présence d'une force de couplage élevée (Almurad et al., 2018, Ezzina et al., 2021b) mais que celle-ci sera toujours plus faible que la longueur moyenne des époques de synchronisation différée aux décalages 1 et 2 comme l'ont présenté Marmelat et Delignières (2012) et Ezzina et al. (2021a) dans leur tâche d'oscillation respective.

2. Méthode.

2.1. Participants.

20 étudiants de l'Université de Montpellier (14 hommes, 6 femmes, 21.7 ans \pm 3.39) ont participé à l'étude au sein du laboratoire Euromov à Montpellier. Les participants ont été recrutés sur la base du volontariat et ne présentaient aucune pathologie motrice apparente. Ils ont été répartis en 10 dyades dont les critères d'inclusion pour chacune d'entre elles étaient les suivantes : avoir un âge similaire (\pm 5 ans d'écart), avoir une taille similaire (\pm 10 centimètres d'écart), et être du même sexe. Lorsque cela était possible, il était demandé aux participants de former une dyade avec une personne qu'ils connaissaient de sorte à ne pas induire de biais liés à l'estime de soi lorsqu'ils étaient dans la condition où les dyades étaient en contact physique. Les participants ont signé un consentement approuvé par le comité d'éthique de Montpellier.

2.2. Tâche et procédure expérimentale.

Les participants étaient assis sur une table, suffisamment haute pour permettre le balancement des jambes. Les dyades avaient pour instruction de réaliser des mouvements synchronisés d'oscillation de la jambe droite, en phase (i.e., avec une synchronisation des points de revirement avant et arrière des deux participants).

Les participants étaient soit assis sur une même table ou chacun sur des tables séparées d'une distance d'un mètre. Lorsqu'ils étaient assis sur la même table, ils devaient se tenir bras-dessus-bras-dessous avec la main libre tenant le bord de la table. Lorsqu'ils étaient sur des tables séparées, ils devaient simplement tenir leurs deux mains sur le bord de la table.

Ils étaient face à un tableau sur lesquelles ont été fixées deux croix noires, chaque croix étant placée face au champ visuel central de chaque participant. Dans la condition de vision restreinte, chacun avait pour consigne de fixer le regard sur la croix située en face de lui. Dans les conditions de vision libre, chaque participant pouvait prélever toute information sur les mouvements de son partenaire.

En croisant ces contraintes, nous avons construit quatre conditions expérimentales :

- Tables séparées – Vision libre (SL).
- Tables séparées – Vision restreinte (SR).
- Table unique – Vision libre (UL)
- Table unique – Vision restreinte (UR).

Pour chaque condition, les participants recevaient comme consigne de réaliser des mouvements d'oscillations de la jambe droite pendant 10 minutes avec comme instruction de se synchroniser avec leur partenaire. Il leur était demandé de réaliser des mouvements les plus naturels possibles. Entre chaque condition, les participants observaient un temps de récupération de 5 minutes pendant lequel ils pouvaient marcher.

L'ordre de passation des quatre conditions a été randomisé entre les dyades. Le temps écoulé était annoncé aux participants toutes les deux minutes et lorsqu'ils perdaient la synchronisation, ils recevaient un retour verbal avec comme consigne de se resynchroniser. Nous avons autorisé les participants à communiquer afin de favoriser la synchronisation interpersonnelle (Shockley et al., 2003).

2.3. Mesures et collecte de données.

L'expérimentation se déroulait dans une salle équipée de caméras Vicon au sein du laboratoire, permettant d'analyser les mouvements de la cheville et du genou droit. Il était demandé aux participants de porter un short ou un pantalon proche du corps, de ne pas porter de bijoux (bague, montre, bracelet, collier), ni de vêtements réfléchissants de sorte à limiter la présence d'occlusions dans l'analyse du mouvement. Deux marqueurs réfléchissants étaient placés sur chaque participant : un sur la malléole externe de la cheville droite et l'autre sur la

partie latérale externe du genou droit. Les mouvements ont été capturés à une fréquence de 100 Hertz sur l'axe des x , y , et z . Les données ont pu être enregistrées grâce au logiciel Vicon Software permettant de les rassembler dans un dossier Excel.

2.4. Traitement des données.

Les données enregistrées sous la forme de dossiers Excel ont été extraites par les logiciels Scilab et Matlab. Les coordonnées brutes ont été translattées en prenant pour origine la position instantanée du marqueur du genou. Les mouvements de la jambe ont été analysées selon l'axe des x , soit l'axe le plus proche de la direction des oscillations produites. Un algorithme de recherche de pics nous a permis de déterminer les dates des points de revirement avant les oscillations produites, et les périodes des oscillations.

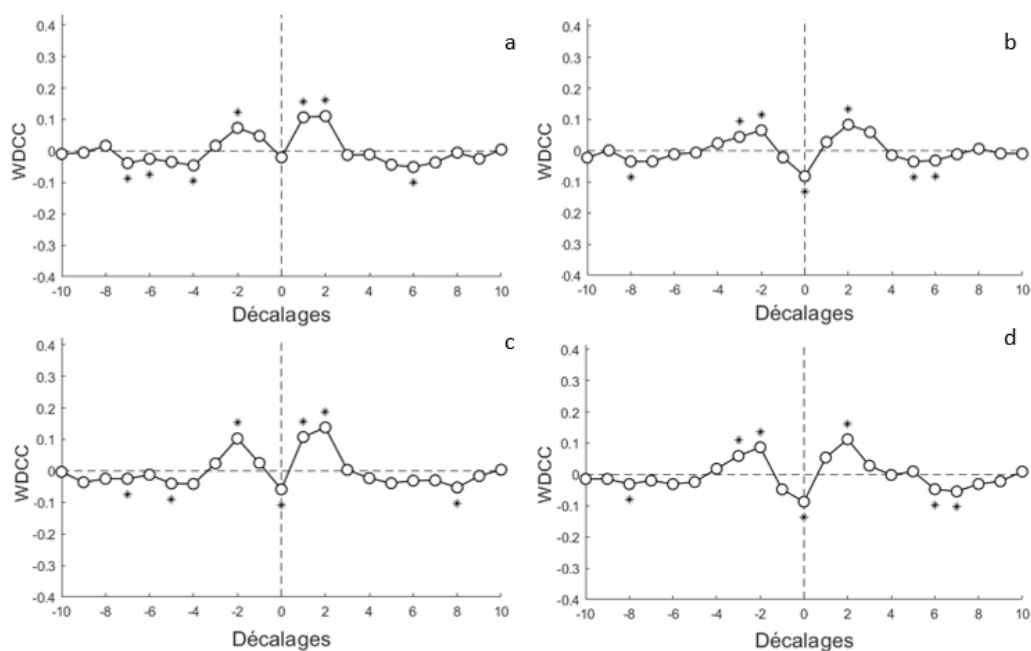
Les séries de périodes ont été analysées par l'algorithme de la WDCC sur des décalages de +/- 10 points et sur des fenêtres d'intervalles de 15 points. Les résultats obtenus ont permis de fournir un aperçu visuel sur le processus de synchronisation dominant dans la tâche d'oscillation ainsi que les décalages moyens associés à chaque fenêtre d'intervalle. Puis, nous avons mesuré la longueur moyenne des époques de coordination interpersonnelle pour la synchronisation immédiate au décalage 0, différée aux décalages 1 et 2, ainsi que leurs pourcentages associés pour les 4 conditions expérimentales à partir de la méthode présentée précédemment (cf : partie 1.4).

Dans l'optique de vérifier si la longueur et le pourcentage moyen des époques de synchronisation sont significativement différents entre les conditions et s'il existe une différence caractéristique entre la longueur et pourcentages moyens des différents modes de synchronisation (aux décalages 0, 1, 2) au sein d'une même condition, nous avons réalisé une ANOVA avec mesures répétées à 2 facteurs (conditions – types de synchronisation) avec un risque $\alpha = 0.05$, et dans le cas échéant, le post-hoc de Bonferroni. Nous avons appliqué la correction de Huynh-Feldt pour l'ensemble des conditions étant donné que la sphéricité des variances n'a pu être respectée.

3. Résultats.

Nous présentons dans la Figure 5 les résultats issus de l'algorithme de la WDCC pour toutes les conditions. Nous observons des décalages -2, -1, +1 et +2 positifs ainsi qu'un décalage 0 toujours négatif ou nul dans toutes les conditions. Nous notons également que les décalages -2 et +2 sont toujours significatifs quelles que soient les conditions ($p < 0.05$), que le décalage +1

ne l'est que dans les conditions où la vision est libre, que le décalage -1 est négatif dans les conditions où la vision est restreinte.



Figures 5 : Fonction WDC dans les conditions : tables séparées – vision libre (SL, 5a) ; tables séparées – vision restreinte (SR, 5b) ; table unique – vision libre (UL, 5c) ; table unique – vision restreinte (UR, 5d).

Sur le Tableau 2 ci-dessous, nous observons que le pourcentage et la longueur et moyenne des époques de synchronisation sont largement dominés par la synchronisation différée aux décalages 1 et 2, avec un pourcentage moyen de 38.56% (soit 18.73 points) pour les décalages 1, et égale à 45.20% (Décalages points) pour les décalages 2 contre 1 Décalages soit 7.865 points) pour la synchronisation immédiate.

Tableau 2 : Longueurs moyennes des époques de synchronisation et pourcentages de la synchronisation totale dans les conditions : tables séparées – vision libre (SL) ; tables séparées – vision restreinte (SR) ; table unique – vision libre (UL) ; table unique – vision restreinte (UR).

| | Longueur moyenne décalage 0 | Longueur moyenne décalage 1 | Longueur moyenne décalage 2 | Pourcentage décalage 0 | Pourcentage décalage 1 | Pourcentage décalage 2 |
|--|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tables séparées – Vision libre (SL) | 6.73 | 20.65 | 21.85 | 13.73 | 41.72 | 44.55 |
| Tables séparées – Vision restreinte (SR) | 8.50 | 17.35 | 21.00 | 17.95 | 37.30 | 44.75 |
| Table unique – Vision libre (UL) | 8.02 | 19.54 | 23.21 | 15.84 | 38.45 | 45.71 |
| Table unique – Vision restreinte (UR) | 8.21 | 17.41 | 21.39 | 17.43 | 36.79 | 45.78 |
| Moyenne | 7.865 | 18.73 | 21.86 | 16.24 | 38.56 | 45.20 |

Nous présentons visuellement les résultats statistiques sur la Figure 6 où nous avons comparé les pourcentages moyens des époques de synchronisation aux décalages 0, 1, et 2. L'ANOVA n'a révélé aucun effet d'interaction entre la condition et le type de synchronisation ($F(5.14) = 0.752, p = 0.593, \eta^2 = 0.064$) ni de la condition sur la longueur des époques de synchronisation ($F(4.03) = 0.858, p = 0.476, \eta^2 < 0.0001$). Néanmoins, nous constatons un effet principal à taille d'effet élevée du type de synchronisation sur la longueur des époques de synchronisation, indépendamment des conditions ($F(2.14) = 113.059, p < 0.0001, \eta^2 = 0.794$). Le post-hoc nous a permis d'observer que le pourcentage moyen de synchronisation immédiate est significativement inférieur à celui de synchronisation différée aux décalages 1 ($t = -15.26, p < 0.0001$) et 2 ($t = -15.78, p < 0.0001$), nous observons également une différence significative entre la synchronisation aux décalages 1 par rapport à la synchronisation aux décalages 2 ($t = -3.23, p < 0.01$). Cette différence de résultats entre les différents types de synchronisation s'observe chez l'ensemble des dyades où la synchronisation différée est toujours supérieure à la synchronisation immédiate.

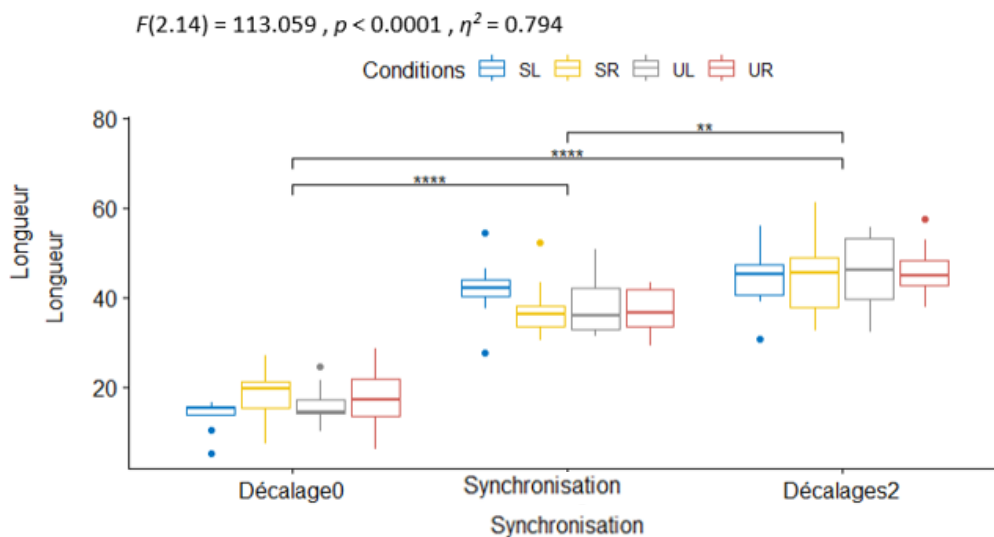


Figure 6 : Comparaison globale des pourcentages moyens des époques de synchronisation ($p < 0.01$; **** $p < 0.0001$) dans les conditions : tables séparées – vision libre (SL, en bleu) ; tables séparées – vision restreinte (SR, en jaune) ; table unique – vision libre (UL, en gris) ; table unique – vision restreinte (UR, en rouge).**

Nous avons comparé sur la Figure 7 les longueurs moyennes des époques de synchronisation aux décalages 0, 1, et 2. L'ANOVA n'a révélé aucun effet d'interaction entre la condition et le type de synchronisation ($F(5.05) = 1.118, p = 0.366, \eta^2 = 0.077$) ni de la condition sur la longueur des époques de synchronisation ($F(4.10) = 1.611, p = 0.213, \eta^2 = 0.029$). Néanmoins, nous constatons un effet principal à taille d'effet élevée du type de synchronisation sur la longueur des époques de synchronisation, indépendamment des

conditions ($F(2,17) = 123.515$, $p < 0.0001$, $\eta^2 = 0.760$). Le post-hoc nous a permis d'observer que la longueur moyenne de la synchronisation immédiate est significativement inférieure à celle de synchronisation différée aux décalages 1 ($t = -14.3$, $p < 0.0001$) et 2 ($t = -15.9$, $p < 0.0001$), nous observons également une différence significative entre la synchronisation aux décalages 1 par rapport à la synchronisation aux décalages 2 ($t = -3.19$, $p < 0.01$). Cette différence de résultats entre les différents types de synchronisation s'observe chez l'ensemble des dyades où la synchronisation différée est toujours supérieure à la synchronisation immédiate.

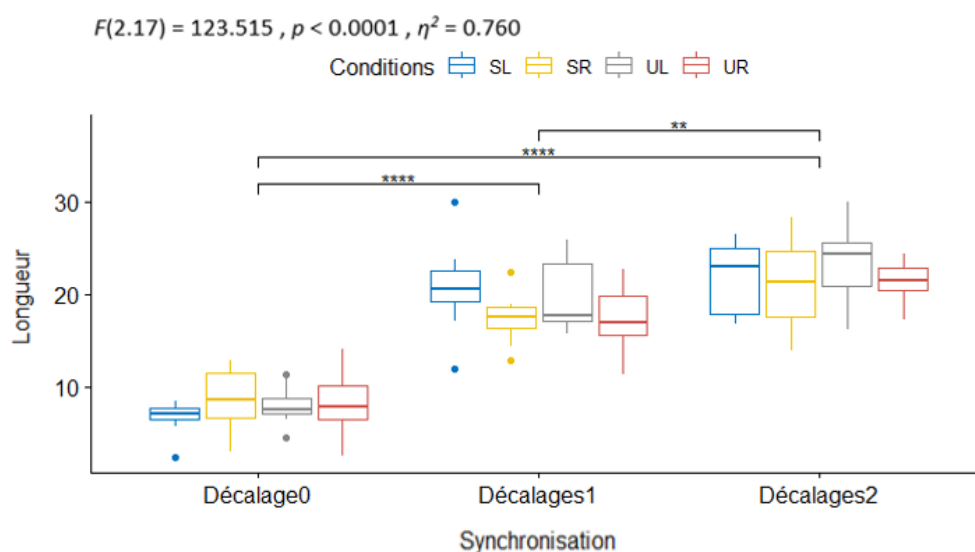


Figure 7 : Comparaison globale des longueurs moyennes des époques de synchronisation ($p < 0.01$; $****p < 0.0001$) dans les conditions : tables séparées – vision libre (SL, en bleu) ; tables séparées – vision restreinte (SR, en jaune) ; table unique – vision libre (UL, en gris) ; table unique – vision restreinte (UR, en rouge).**

4. Discussion.

4.1. Hypothèses expérimentales.

Nous avons émis une première hypothèse stipulant que la synchronisation différée serait dominante dans notre tâche expérimentale quelles que soient les conditions, cela fut montré dans la fonction WDCC où nous avons observé que les décalages -2, +1, et +2 étaient toujours positifs et supérieurs à 0 avec des décalages -2 et +2 constamment significatifs. Ceci fut également confirmé dans l'ANOVA où les pourcentages et longueurs moyennes des époques de synchronisation différée aux décalages 1 et 2 étaient significativement supérieures à celles des époques de synchronisation immédiate, signifiant que la synchronisation différée est le mode de coordination le plus prégnant ainsi que le plus stable. Ce résultat s'accorde avec celui

obtenu par Marmelat et Delignières (2012) qui ont présenté dans leur tâche d'oscillation une dominance de la synchronisation différée aux décalages 1 et 2.

Nous avons également proposé une seconde hypothèse suggérant que la force du couplage favoriserait la synchronisation immédiate, comme l'ont présenté Almurad et al. (2018) et Ezzina et al. (2021b) dans leurs travaux sur la marche synchronisée. Nous rejetons cependant cette hypothèse puisque la fonction WDCC ne présente aucune différence apparente et statistique selon les conditions, et que l'ANOVA n'a révélé aucun effet significatif de la condition sur le pourcentage et la longueur moyenne des époques de synchronisation. Ceci suggère que le couplage physique, mécanique, et informationnel ne présentent aucun effet sur le mode synchronisation dans notre tâche d'oscillations de la jambe droite. Nous pourrions expliquer ce résultat par le fait que ces formes de couplage ne seraient efficaces que dans la marche puisque il s'agit à ce jour de la seule tâche qui a permis de rendre compte de cet effet. Marmelat et Delignières (2012) ainsi que Ezzina et al. (2021a) n'ont présenté aucun effet significatif du couplage dans leurs tâches de tapping et d'oscillations, le Tableau 1 présenté dans l'introduction témoigne de cette différence anecdotique sur la longueur moyenne de l'époque de synchronisation immédiate.

Nous pourrions de même expliquer cette dominance de la synchronisation différée de par les retours verbaux fournis aux dyades. En effet, dans notre expérimentation, nous avons décidé de toujours prévenir les sujets lorsqu'ils perdaient la synchronisation de sorte à ce qu'ils la retrouvent le plus rapidement possible. Cette consigne aurait pu influencer les participants sur leur mode de synchronisation et au lieu de les inciter à corriger directement leur asynchronies, nous aurions pu les laisser retrouver leur synchronisation de manière naturelle, comme ce fut le cas dans les études de Schmidt et al. (1990, 1998). Des analyses plus approfondies sont nécessaires afin de mesurer la réelle influence de cette consigne.

En outre, nous montrons dans notre étude que si la synchronisation différée est privilégiée, on observe aussi de légères périodes de synchronisation immédiate, suggérant comme dans les travaux précédents, l'existence d'un fonctionnement alternatif entre les deux modes de synchronisation, avec tout de même un mode préférentiel.

4.2. Alternance entre synchronisation immédiate et différée dans la tâche expérimentale.

Nos résultats avec ceux présentés précédemment (Tableaux 1 et 2) nous laissent présupposer que lier un des 3 modèles présentés dans l'introduction à une tâche particulière semble illusoire, puisque les modes de synchronisation varient au cours d'un essai avec

plusieurs transitions entre les modes de synchronisation immédiate et différée. Ces résultats invalident clairement certaines positions antérieurement défendues (et notamment certaines issues de notre équipe), avançant que certaines tâches, par exemple en fonction du caractère discret ou continu des mouvements requis, pouvaient renvoyer de manière exclusive à un manifeste mode de synchronisation (Ezzina et al., 2021a; Konvalinka et al., 2010; Repp & Su, 2013; Roume et al., 2018; Schmidt et al., 1990). D'un point de vue fondamental, ces résultats mènent à requestionner un certain nombre de modèles proposés dans la littérature, soit dans le paradigme cognitiviste, soit dans celui de la dynamique des coordinations, souvent présentés comme des modes de fonctionnement archétypiques, mais qui semblent incapables de rendre compte de manière absolue des comportements réellement adoptés par les individus (sur des perspectives similaires concernant les processus de timing, voir Delignières & Torre, 2011).

Néanmoins, grâce à la méthode d'analyse de l'évolution des modes de synchronisation, nous pouvons identifier certains types préférentiels de synchronisation. Dans notre tâche d'oscillation, la synchronisation différée aux décalages 1 et 2 est dominante, suggérant que les individus se synchronisent sur la base de la correction de l'asynchronie par rapport à l'oscillation $n-1$ et $n-2$. Cette correction aux décalages 2 est accentuée lorsque les participants étaient dans la condition de table unique – vision restreinte (Fig. 6).

De plus, nous montrons également que la tâche d'oscillation réalisée ne reflète pas le modèle des oscillateurs couplés établi par Haken, Kelso, et Bunz (1985) comme ont pu le présenter d'autres auteurs dans leurs tâches d'oscillations respectives (Ezzina et al., 2021a; Marmelat & Delignières, 2012). Ceci appuyant l'idée que ce modèle ne reflète pas la réalité malgré la présence de légères périodes de synchronisation immédiate. Nous pouvons interpréter ces courtes phases de synchronisation immédiate comme des périodes « accidentelles » où les deux partenaires coordonnent leurs mouvements de manière quasiment parfaite, puis lorsque la synchronisation est perdue, cette phase serait remplacée par une période de synchronisation différée sur un ou deux décalages où au moins l'un des deux participants corrige l'asynchronie qu'il perçoit avec son partenaire. Cependant, nous ne savons pas expliquer comment la synchronisation immédiate émerge après une phase de correction de l'asynchronie, bien qu'elle soit apparente dans les séries (Fig. 4).

4.3. Alternance entre synchronisation immédiate et différée dans les modèles de synchronisation.

Nos résultats peuvent cependant être relativisés au regard des séries que les modèles présentés dans l'introduction permettent eux-mêmes de générer. Nous avons ainsi appliqué notre méthode d'analyse de la dynamique des modes de synchronisation sur des séries simulées par Roume et al. (2018) à partir du modèle de correction mutuelle des asynchronies (Eq. 5) et du modèle des oscillateurs couplés (Eq. 6).

Pour le modèle de correction mutuelle des asynchronies (Eq. 5 ci-dessous), les paramètres de correction ont été fixés à $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.4$, et les paramètres de bruit à $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$. $I_1^*(n)$ et $I_2^*(n)$ étaient modélisées comme deux séries fractales, d'exposant $H = 0.9$, faiblement corrélées à long-terme, avec une cross-corrélation de 0.2 (pour plus de détails voir Roume et al., 2018).

$$\begin{aligned} I_1(n) &= -A_1(n-1) + \gamma_1 [B_1(n) - B_1(n-1)] \\ I_2(n) &= I_2^*(n) - \alpha_2 A_2(n-1) + \gamma_2 [B_2(n) - B_2(n-1)] \end{aligned} \quad (5)$$

Pour le modèle des oscillateurs couplés (Eq. 6 ci-dessous), les valeurs suivantes sont utilisées : $\delta = 0.5$, $\lambda = 0.02$, $\gamma = 1$, $a = 1$, $b = 0.25$, et $q_1 = q_2 = 0.03$, et ω_t est modélisée par une série fractale avec $H = 0.9$; $\omega_0 = 4\pi$, et $\sigma = 0.04$.

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \delta \dot{x}_1 + \lambda \dot{x}_1^3 + \gamma x_1^2 \dot{x}_1 + \omega_t^2 x_1 = (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)[a + b(x_1 - x_2)^2] + q_1 \varepsilon_1 \\ \ddot{x}_2 + \delta \dot{x}_2 + \lambda \dot{x}_2^3 + \gamma x_2^2 \dot{x}_2 + \omega_t^2 x_2 = (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)[a + b(x_2 - x_1)^2] + q_2 \varepsilon_2 \end{cases} \quad (6)$$

Pour les deux modèles, 12 paires de séries d'une longueur de 1024 points ont été générées. Les résultats de la WDCC ont déjà été présentés dans l'introduction de ce mémoire (Fig. 1 et 2, respectivement). La WDCC moyenne montre pour le modèle de correction mutuelle des asynchronies deux pics positifs aux décalages -1 et +1 ainsi qu'un pic négatif au décalage 0 (Fig. 1). Pour le modèle des oscillateurs couplés, on obtient un pic positif très élevé au décalage 0 et nul sur les autres décalages (Fig. 2).

Nous présentons dans le Tableau 3 les résultats de la WDCC glissante sur ces séries simulées. Pour rappel, la WDCC moyenne représente le mode de synchronisation dominant (cf : Fig. 1, 2, 3, et 5) et la WDCC glissante la longueur moyenne de ces modes de synchronisation (cf : Tableaux 1, 2, 3). Dans cette dernière, nous constatons, de manière surprenante, même si ces deux modèles ne contiennent formellement que des processus de correction discrète des asynchronies pour le premier, et qu'un couplage continu pour le second, que l'on retrouve à nouveau une alternance entre les deux modes de synchronisation dans les

séries générées. Le modèle de correction des asynchronies génère de courtes périodes de synchronisation immédiate avec une longueur moyenne de 3.87 points successifs (8.24% de la synchronisation totale), et le modèle des oscillateurs couplés des phases de correction des asynchronies aux décalages 1, avec une longueur moyenne de 13.79 points (21.09% de la synchronisation totale) et aux décalages 2 avec une longueur moyenne de 8.74 points (13.56% de la synchronisation totale).

Tableau 3 : Longueurs moyennes des époques de synchronisation et pourcentages de la synchronisation totale, pour les modèles de correction des asynchronies et des oscillateurs couplés (Roume et al., 2018).

| | Longueur moyenne décalage 0 | Longueur moyenne décalage 1 | Longueur moyenne décalage 2 | Pourcentage décalage 0 | Pourcentage décalage 1 | Pourcentage décalage 2 |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Modèle de correction mutuelle des asynchronies (Roume et al., 2018) | 3.87 | 27.58 | 15.48 | 8.24 | 58.79 | 32.97 |
| Modèle des oscillateurs couplés (Roume et al., 2018) | 46.41 | 13.79 | 8.74 | 65.35 | 21.09 | 13.56 |

Dans le premier cas, nous pouvons supposer que malgré la présence de bruits, il y ait très peu d'erreurs de temps entre les tapes des participants, laissant place à de brèves phases de synchronisation immédiate. Dans le second, on peut présumer que la présence de bruits fait à certains moments perdre de la synchronisation, et que le couplage, bien que continu, requiert plusieurs cycles pour la récupérer, mimant de la sorte une synchronisation différée.

Il est néanmoins rassurant que ces modèles génèrent tout de même de manière prioritaire les modes de synchronisation attendus (58.79% de synchronisation différée de décalage 1 pour le premier, 65.35% de synchronisation immédiate pour le second) même si on aurait pu s'attendre à des pourcentages plus importants. Des investigations complémentaires, jouant sur la valeur des paramètres, et notamment la force des composantes de bruits, pourraient permettre de mieux comprendre ces résultats.

Le pattern de modes de synchronisation produit par le modèle de correction des asynchronies n'est pas fondamentalement différent de celui obtenu avec les données d'Ezzina et al. (2021a) dans la tâche de tapping synchronisée (voir Tableau 1). Il n'en est pas de même pour les données collectées dans des tâches « oscillatoires », que ce soit celles de Marmelat et Delignières (2012), de Ezzina et al. (2021a) ou celles du présent travail, qui étaient supposées être pilotées par des processus de couplage continu, et qui sont loin d'afficher des pourcentages

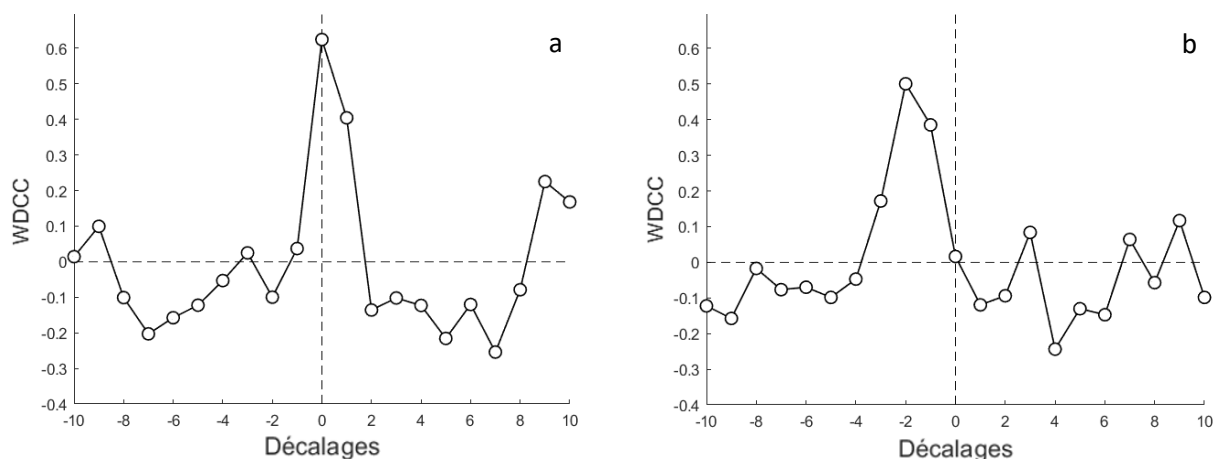
similaires de synchronisation immédiate à celles produites par le modèle des oscillateurs couplés.

4.4. La problématique de l'appariement des complexités.

Le *complexity matching* suppose également une problématique intéressante sur ses conditions d'émergence, nécessitant de retravailler cette théorie proposée dans les récents travaux de notre équipe afin d'en modéliser les processus. Bien que ce phénomène soit apparu récemment avec une signature corrélacionnelle bien distincte des autres modes de synchronisation (avec un pic modéré de cross-corrélation positive au décalage 0, voir Fig. 3), nous n'avons cependant jamais observé ce phénomène lorsque nous avons analysé l'évolution de la synchronisation, que ce soit dans notre expérimentation ou dans celles stipulant son existence dans la fonction globale de la WDCC (Almurad et al., 2017, 2018; Ezzina et al., 2021b). Les observations réalisées sur l'évolution du décalage 0, -1, et +1 dans la Figure 4 permettent d'appuyer l'hypothèse que la signature de l'appariement des complexités serait plutôt une moyenne des époques de synchronisation immédiate et différée. Autrement dit, le *complexity matching* ne serait que le produit final d'une alternance entre le modèle de correction des asynchronies avec celui des oscillateurs couplés.

De fait, nous nous sommes livrés à un traitement complémentaire pour illustrer cette hypothèse : Si l'on découpe les séries en périodes de 128 points dans l'étude de marche synchronisée en condition bras-dessus-bras-dessous chez la 7^{ème} dyade (Almurad et al., 2018), on obtient dans chaque fenêtre des corrélations croisées moyennes très différentes. Dans la figure suivante (Fig. 8) on peut voir à gauche la WDCC moyenne qui correspond au 128 premiers points de la série, avec une synchronisation immédiate marquée par un pic positif élevé au décalage 0 (supérieur à 0.6), accompagné d'un autre pic au décalage +1, supérieur à 0.4. Dans la Figure 8b de droite, qui rend compte d'une fenêtre plus tardive dans la série (point 385 à 512), on observe une cross-corrélation de décalage 0 presque nulle et deux décalages -2 et -1 très élevés (supérieurs à 0.4). Nous retrouvons cette hétérogénéité plus ou moins fortement dans l'ensemble des séries produites par les dyades de participants.

Cette analyse permet de distinguer deux modes de synchronisation: une synchronisation immédiate qui renverrait au modèle des oscillateurs couplés, et une synchronisation différée avec au moins un décalage -2, -1, +1, ou +2, avec un décalage 0 nul ou négatif, renvoyant à une forme de correction de l'asynchronie. La signature du *complexity matching* ne résulterait que de la procédure de moyennage opérée par la WDCC.



Figures 8: Fonction WDCC dans la marche synchronisée bras-dessus-bras-dessous du point 1 au point 128 (8a) et du point 385 au point 512 (8b) (données brutes de Almurad et al., 2018).

Cette hypothèse pourrait aussi être supportée par les valeurs rapportées dans le Tableau 1 où l'on observe une longueur moyenne des époques de synchronisation similaire entre les différents modes de coordination (16.09 pour la synchronisation au décalage 0, 17.89 points pour la synchronisation aux décalages 1, 16.34 points pour la synchronisation aux décalages 2). Malgré une longueur moyenne légèrement plus faible, nous pourrions expliquer la dominance de la synchronisation immédiate par des valeurs de cross-corrélation très élevées au décalage 0 (Fig. 8a), typiques du modèle des oscillateurs couplés. On conçoit que cette hypothèse contredit les théories précédemment développées à ce sujet, notamment au sein de notre équipe (Almurad et al., 2017, 2018; Delignières & Marmelat, 2014; Delignières et al., 2016; Marlemat & Delignières, 2012).

Cette impossibilité à mettre en évidence une signature statistique consistante de l'appariement des complexités questionne également le modèle présenté par Mahmoodi et ses collaborateurs (2020), qui ont démontré que le *complexity matching* était à l'origine de la restauration de la complexité mise en évidence par Almurad et al. (2018). Cela remet ainsi en cause le transfert de multifractalité entre les systèmes ainsi que l'attraction du système le moins complexe vers le système le plus complexe de sorte à ce qu'ils se synchronisent (Bohora et al., 2017). Néanmoins, même si les séries présentant du *complexity matching* ne sont pas stables dans le temps, cela ne modifie pas les résultats obtenus par Almurad et al. (2018) et Ezzina et al. (2021a) et sur la réelle efficacité de la marche bras-dessus-bras-dessous sur la restauration de la complexité chez les personnes âgées. Cependant, les résultats que l'on a obtenu nous invitent à réétudier ce modèle et à se questionner sur les conditions d'émergence qui favorisent ce phénomène de restauration chez ces personnes.

4.5. Plusieurs pistes d'optimisation de la restauration de la complexité.

4.5.1. Le couplage des oscillateurs.

Si l'on suit l'hypothèse que le phénomène d'appariement des complexités ne serait que le résultat d'une alternance entre le modèle des oscillateurs couplés avec celui de la correction des asynchronies, on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit de ce couplage continu et étroit entre les deux systèmes qui est à l'origine de la restauration de la complexité du système déficient. Il conviendrait ainsi d'optimiser au maximum le premier modèle dans les séries temporelles. En effet, la fonction moyenne de la WDCC pour le modèle des oscillateurs couplés présente un décalage 0 positif et supérieur à tous les autres décalages (Fig. 2) comme pour l'appariement des complexités, mais à un niveau moins élevé (Fig. 3). En ce sens, nous pourrions suggérer que le couplage des oscillateurs serait comme un phénomène d'appariement des complexités, mais avec une forme de synchronisation immédiate nettement plus importante, et une forme de synchronisation différée plus discrète, ce qui est le cas inverse dans le modèle de correction des asynchronies. Ainsi, cet assemblage entre ces deux types de synchronisation pourrait expliquer pourquoi le décalage 0 est plus faible dans le modèle du *complexity matching* ainsi que la présence des décalages -1 et +1 par les processus de correction de l'asynchronie qui interviennent au cours des séries.

En outre, nous pourrions expliquer la restauration de la complexité chez les personnes âgées uniquement sur les moments où le décalage 0 est extrêmement élevé, et que les phases de correction de l'asynchronie serviraient à retrouver la synchronisation, mais sans effet significatif sur la restauration de la complexité. Ainsi, en optimisant au maximum le couplage des oscillateurs et par la même occasion la synchronisation immédiate, le décalage 0 serait plus élevé, favorisant le processus de restauration de la complexité chez les personnes âgées. Les auteurs ayant travaillé sur cette thématique ont montré que cette récupération était plus importante lorsque le décalage 0 était plus élevé (Almurad et al., 2018; Ezzina et al., 2021a).

4.5.2. La force du couplage.

Les travaux portant sur la restauration de la complexité chez les personnes âgées ont permis d'observer que la force du couplage était un élément déterminant sur ce phénomène thérapeutique. Dans les études menées par Almurad et al. (2018) et Ezzina et al. (2021b), les auteurs ont observé une restauration plus importante de la complexité dans la condition où les personnes âgées devaient marcher bras-dessus-bras-dessus avec la jeune adulte. Ils avaient comparé les résultats de ce groupe avec les personnes qui devaient marcher simplement côte-

à-côte sans contact physique. Les auteurs ont ainsi expliqué cette différence par le couplage physique, qui serait un facteur favorisant l'appariement des complexités et ainsi sa récupération chez les personnes âgées.

Nous avons tenté de confirmer cette suggestion dans notre tâche expérimentale. Cependant, nous n'avons observé aucun effet du couplage physique ni de signatures s'apparentant au *complexity matching*. Notre étude montre, en accord avec d'autres (Ezzina et al., 2021; Marmelat & Delignières, 2012) que les tâches de laboratoire ne favorisent pas la synchronisation immédiate et renvoient plutôt à un phénomène de correction des asynchronies. Cela signifierait en conséquence que l'on ne pourrait guère restaurer la complexité des personnes âgées dans ce type de tâche.

4.5.3. *La marche, seule activité thérapeutique efficace ?*

Nous pourrions supposer que la marche dyadique serait potentiellement la seule activité efficace sur la restauration de la complexité puisqu'il s'agit de la seule tâche où nous retrouvons aisément le phénomène de synchronisation immédiate. Bien que nous n'ayons jamais testé les tâches de tapping ou d'oscillations sur les personnes âgées, nous ne pensons pas trouver une forme de moyen thérapeutique étant donné l'infime présence de synchronisation immédiate. Almurad et al. (2017) dans leur première étude, ont mis en évidence ce processus de synchronisation chez des jeunes sujets avant de le tester sur des personnes âgées, suggérant que cette forme de synchronisation devrait apparaître chez des jeunes personnes saines dont la complexité est optimale avant de le tester sur des personnes plus fragiles dont la complexité est réduite (pour l'évaluation de la complexité, voir Goldberger et al., 2002; Hausdorff et al., 1997, 2007).

Aujourd'hui, seule la marche bras-dessus-bras-dessous a permis de montrer une importante forme de synchronisation immédiate, et il semble difficile de trouver une autre tâche qui marquerait sa présence malgré les nombreuses conditions proposées censées favoriser son émergence (même table, contact physique et visuel). Nous pensons que le meilleur outil thérapeutique dans la restauration de la complexité à ce jour serait de faire marcher deux personnes ensemble en les faisant se tenir bras-dessus-bras-dessous.

5. *Conclusion.*

Cette expérimentation nous a permis de montrer que les modèles de synchronisation interpersonnelle ne sont pas homogènes dans les séries puisque l'on retrouve une alternance entre les différents modes de synchronisation (immédiate et différée). Notre tâche a montré que

la force du couplage n'était pas efficace sur la synchronisation immédiate, et que sa présence et sa stabilité étaient nettement inférieures par rapport à la synchronisation différée, comme ce fut le cas dans les autres tâches oscillatoires (Ezzina et al., 2021a; Marmelat & Delignières, 2012), confirmant ainsi que la synchronisation immédiate est plus largement présente et stable dans la marche synchronisée. Cette remarque nous invite à supposer que plus les plages de synchronisation immédiates sont fréquentes et longues, plus l'appariement des complexités sera optimisée, favorisant sa restauration chez les personnes âgées.

Néanmoins, nous avons constaté que le phénomène d'appariement des complexités n'apparaissait jamais à l'intérieur des séries de marche que nous avons analysé (Almurad et al., 2018, semaine 4, session 2) comme l'ont suggéré Almurad et al. (2017) dans leur première étude. Cela nous a invité à conclure que ce processus serait le résultat d'une alternance entre le modèle des oscillateurs couplés et celui de correction des asynchronies où sur de courtes périodes, l'un des deux modes de synchronisation est préféré à l'autre, et inversement. Il ne faut cependant pas oublier que nous n'avons analysé qu'une session de marche parmi les 44 réalisées dans l'expérimentation de Almurad et al. (2018). De plus importantes analyses sont clairement nécessaires afin de modéliser ce processus et de favoriser les conditions d'émergence dans l'optique de pouvoir éventuellement proposer cette activité comme un outil thérapeutique efficace chez les personnes âgées et à maladies neurodégénératives.

6. Références.

Abney, D. H., Paxton, A., Dale, R., & Kello, C. T. (2014). *Complexity matching* in dyadic conversation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(6), 2304-2315. <https://doi.org/10.1037/xge0000021>

Almurad, Z. M. H., Roume, C., Blain, H., & Delignières, D. (2018). *Complexity matching* : Restoring the Complexity of Locomotion in Older People Through Arm-in-Arm Walking. *Frontiers in Physiology*, 9, 1766. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01766>

Almurad, Z. M. H., Roume, C., & Delignières, D. (2017). *Complexity matching* in side-by-side walking. *Human Movement Science*, 54, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.04.008>

Balocchi, R., Varanini, M., & Macerata, A. (2013). Quantifying different degrees of coupling in detrended cross-correlation analysis. *EPL (Europhysics Letters)*, 101(2), 20011. Retrieved from <https://doi.org/10.1209/0295-5075/101/20011>

Bohara, G., Lambert, D., West, B. J., and Grigolini, P. (2017). Crucial events, randomness, and multifractality in heartbeats. *Phys. Rev. E* 96:062216 doi: 10.1103/PhysRevE.96.062216

Boker, S. M., Rotondo, J. L., Xu, M., & King, K. (2002). Windowed cross-correlation and peak picking for the analysis of variability in the association between behavioral time series. *Psychological Methods*, 7(3), 338-355. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.7.3.338>

Delignières, D., Almurad, Z. M. H., Roume, C., & Marmelat, V. (2016). Multifractal signatures of complexity matching. *Experimental Brain Research*, 234(10), 2773-2785. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4679-4>

Delignières, D., Lemoine, L., & Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23(2), 87-103. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2004.07.001>

Delignières, D., & Marmelat, V. (2014). Strong anticipation and long-range cross-correlation : Application of detrended cross-correlation analysis to human behavioral data. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 394, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2013.09.037>

Dubois, D. M. (2003). Mathematical Foundations of Discrete and Functional Systems with Strong and Weak Anticipations. In M. V. Butz, O. Sigaud, & P. Gérard (Éd.), 147 *Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems* (Vol. 2684, p. 110-132). https://doi.org/10.1007/978-3-540-45002-3_7

Ezzina, S., Scotti, M., Roume, C., Pla, S., Blain, H., & Delignières, D. (2021a). Interpersonal Synchronization Processes in Discrete and Continuous Tasks. *Journal of Motor Behavior*, 53(5), 583-597. <https://doi.org/10.1080/00222895.2020.1811629>

Ezzina, S., Roume, C., Pla, S., Blain, H., & Delignières, D. (2021b). Restoring walking complexity in elderly through arm-in-arm walking: Were Almurad et al. (2018)'s results an artifact? *Motor Control*, 25(3), 475-490.

Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. Ch., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology : Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(Supplement 1), 2466-2472. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>

Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, *51*(5), 347-356. <https://doi.org/10.1007/BF00336922>

Hausdorff, J., Mitchell, S., Firtion, R., Peng, C., Cudkowicz, M., Wei, J., & Goldberger, A. (1997). Altered fractal dynamics of gait : *Reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease*. *Journal of Applied Physiology*, (Bethesda, Md.: 1985), *82*(1), 262-269. doi:<https://doi.org/10.1152/jappl.1997.82.1.262>

Hausdorff J. M. (2007). Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Human movement science*, *26*(4), 555–589. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.05.003>

Kaipust, J. P., McGrath, D., Mukherjee, M., & Stergiou, N. (2013). Gait Variability is Altered in Older Adults When Listening to Auditory Stimuli with Differing Temporal Structures. *Annals of Biomedical Engineering*, *41*(8), 1595-1603. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0654-9>

Konvalinka, I., Vuust, P., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2010). Follow you, Follow me : Continuous Mutual Prediction and Adaptation in Joint Tapping. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(11), 2220-2230. <https://doi.org/10.1080/17470218.2010.497843>

Madison, G. (2005). Timing of Action During and After Synchronization With Linearly Changing Intervals. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, *22*(3), 441-459. <https://doi.org/10.1525/mp.2005.22.3.441>

Mahmoodi, K., West, B. J., & Grigolini, P. (2017). Self-organizing Complex Networks : Individual versus global rules. *Frontiers in Physiology*, *8*, 478. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00478>

Mahmoodi, K., West, B. J., & Grigolini, P. (2018). *Complexity matching* and Requisite Variety. arXiv:1806.08808 [nlin]. Consulté à l'adresse <http://arxiv.org/abs/1806.08808>

Mahmoodi, K., West, B. J., & Grigolini, P. (2020). Complex Periodicity and Synchronization. *Frontiers in Physiology*, *11*, 563068. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.563068>

Marmelat, V., & Delignières, D. (2012). Strong anticipation : *Complexity matching* in interpersonal coordination. *Experimental Brain Research*, *222*(1-2), 137-148. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3202-9>

- Nowicki, L., Prinz, W., Grosjean, M., Repp, B. H., & Keller, P. E. (2013). Mutual adaptive timing in interpersonal action coordination. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 23(1), 6-20. doi:<https://doi.org/10.1037/a0032039>
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969-992. <https://doi.org/10.3758/BF03206433>
- Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403-452. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0371-2>
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26(6), 867-891. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.002>
- Roume, C., Almurad, Z. M. H., Scotti, M., Ezzina, S., Blain, H., & Delignières, D. (2018). Windowed detrended cross-correlation analysis of synchronization processes. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 503, 1131-1150. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.074>
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: Coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 884-900. Retrieved from <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.3.884>
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 227-247. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.2.227>
- Shockley K, Santana MV, Fowler CA. Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2003 Apr;29(2):326-332. doi: 10.1037/0096-1523.29.2.326. PMID: 12760618.
- Schöner, G., Haken, H. & Kelso, J.A.S. A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biol. Cybern.* 53, 247–257 (1986). <https://doi.org/10.1007/BF00336995>

Stephen, D. G., & Dixon, J. A. (2011). Strong anticipation : Multifractal cascade dynamics modulate scaling in synchronization behaviors. *Chaos, Solitons & Fractals*, 44(1-3), 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2011.01.005>

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(2), 284-296. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.08.003>

Vorberg, D., & Wing, A. (1996). Chapter 4 Modeling variability and dependence in timing. In *Handbook of Perception and Action* (Vol. 2, p. 181-262). [https://doi.org/10.1016/S1874-5822\(06\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S1874-5822(06)80007-1)

West, B. J., Geneston, E. L., & Grigolini, P. (2008). Maximizing information exchange between complex networks. *Physics Reports*, 468(1-3), 1-99. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2008.06.003>

Abstract :

Interpersonal synchronisation represents a common phenomenon in everyday activities. To date, three models of synchronisation have been defined based on cross-correlation analysis to account for it : mutual correction of asynchronies, coupled oscillators model, and complexity matching. However, this analysis only reflects an average synchronisation mode and does not account for its evolution over time. A sliding analysis of the cross-correlation reveals an alternation between epochs of immediate and delayed synchronisation. The analysis of these epochs and their temporal salience shows that delayed synchronisation is a preferred mode in most laboratory tasks, both discrete and continuous, and a more balanced distribution in the synchronised walk. In the present experiment, we proposed to dyads of participants to synchronise the pendular movements of their right leg in four conditions differentiated by the strength of the coupling. We show the coexistence of these two coordination modes with a dominance of delayed synchronisation at lags 1 and 2, suggesting that participants mostly correct their partner's asynchrony on the previous two oscillations to synchronise.

Keywords : Interpersonal synchronisation, oscillations, cross-correlations, complexity matching.

Résumé :

La synchronisation interpersonnelle représente un phénomène courant dans les activités quotidiennes. A ce jour, trois modèles de synchronisation sont définis à partir de l'analyse de corrélations croisées pour en rendre compte : la correction mutuelle des asynchronies, le modèle des oscillateurs couplés, et l'appariement des complexités. Néanmoins, cette analyse ne reflète qu'un mode de synchronisation moyen et ne rend pas compte son évolution dans le temps. Une analyse glissante des corrélations croisées révèle une alternance entre des époques de synchronisation immédiate et de synchronisation différée. L'analyse de ces époques et de leur prégnance temporelle montre que la synchronisation différée est un mode préférentiel dans la majorité des tâches de laboratoires, discrètes et continues et une répartition plus équilibrée dans la marche synchronisée. Dans la présente expérimentation, nous avons proposé à des dyades de participants de synchroniser les mouvements pendulaires de leur jambe droite dans quatre conditions différenciées par la force du couplage. Nous montrons la coexistence de ces deux modes de coordination avec une dominance de la synchronisation différée aux décalages 1 et 2, suggérant que les participants corrigent majoritairement l'asynchronie de leur partenaire sur les deux oscillations précédentes pour se synchroniser.

Mots clés : Synchronisation interpersonnelle, oscillations, corrélations croisées, appariement des complexités.