



HAL
open science

Improvisation socio-motrice : quels impacts sur le comportement moteur ?

Mathieu Gueugnon

► **To cite this version:**

Mathieu Gueugnon. Improvisation socio-motrice : quels impacts sur le comportement moteur ?. Médecine humaine et pathologie. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONT4002 . tel-01507426

HAL Id: tel-01507426

<https://theses.hal.science/tel-01507426>

Submitted on 13 Apr 2017

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par l'**Université de Montpellier**

Préparée au sein de l'école doctorale Sciences du
Mouvement Humain (ED 463) et
De l'unité de recherche EuroMov
(EA 2991 - 700 avenue du Pic Saint Loup,
34090 Montpellier)

Présentée par **Mathieu GUEUGNON**

**Improvisation socio-motrice : quels
impacts sur le comportement moteur?**

**Soutenue le 21 octobre 2016 devant le jury présidé par le Pr Seifert et
composé de :**

Mr Philippe Gaussier, Professeur, Université de Cergy-Pontoise	Rapporteur
Mr Ludovic Seifert, Professeur, Université de Rouen	Rapporteur
Mr Johann Issartel, Lecturer, Dublin City University	Examineur
Mr Ludovic Marin, MCF-HDR, Université de Montpellier	Directeur
Mr Benoît Bardy, Professeur, Université de Montpellier	Co-directeur
Mr Robin Salesse, Ingénieur de recherche, Université de Montpellier & CHU de Montpellier	Co-encadrant



*“It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul.”*

William Ernest Henley, Invictus

Remerciements

Comment écrire l'équivalent de 200 pages, sans prendre le temps de remercier toutes celles et ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail. Vous avez tous d'une manière ou d'une autre joué un rôle prépondérant dans l'accomplissement de ce travail. Je n'entends pas ici seulement une aide professionnelle, mais également des aides affective et morale qui sont pour moi primordiales. Durant ces trois années et demi de thèse, je n'ai pas toujours été des plus présents, des plus sympathiques, des plus drôles, des plus attentifs mais malgré tout, vous, Famille, Amis et Collègues avez toujours été présents. Merci.

Papa, Maman je ne vous remercierai jamais assez pour tout ce que vous avez fait pour moi. C'est grâce à vous que j'en suis arrivé là. Vous m'avez toujours tellement apporté et soutenu. Merci pour tout ce que vous avez fait et ce que vous faites encore. Ce travail vous est dédié. J'espère que vous êtes fiers de moi et que je ne vous ai pas déçu.

Fanny, tu as bien évidemment participé à la finalisation de ce travail. Nos disputes frère-sœur m'ont entre autre permis de développer un certain attrait pour les joutes verbales ô combien importantes dans ce monde impitoyable qu'est la recherche. Blague à part, tu as toujours été là dans les moments les plus durs. Merci Sœurette. Merci aussi à toi Jean-Phil' et à la plus jolie des nièces Olivia pour m'avoir aidé dans les moments difficiles.

Je souhaite également vous remercier tontons et tatas, cousins et cousines, petits cousins et petites cousines, Tom, et bien sûr mes papys Gueugnon et mes papys Gravallon. Mamie Henriette, je ne serai pas instituteur mais j'espère que tu es tout de même fière de moi là-haut... Vous avez tous, à votre manière, joué un rôle important dans mon bien-être et mon équilibre. Merci.

Bien évidemment, il y a vous aussi les amis. Tout d'abord, les amis de longue date qui m'ont suivi et encouragé durant ce travail. Vous avez toujours été là dans les durs moments. Merci à vous les copains de Paris (Antoine, Clém, Méric, Adelin et Manu), de Québec (Camille), de Bourg-en-Bresse (Tiennou), de Montpellier (Juju la chaudière), de Crissey (Sébi et Fabi) ou du Mexique (François mon jum's).

Merci à vous aussi les copains rencontrés à Montpellier qui êtes devenus de véritables amis. Sans vous et les bons moments passés ensemble, je n'aurais pas apprécié cette thèse de la même manière.

Je pense bien évidemment à vous : Ju, Gé et Fran. Que de bons moments passés avec vous : les barathons où Ju se barre sans prévenir, le trail où Fran part comme une balle et crampe à partir du 12^{ème} km (alors qu'il en reste encore 9), les parties de pétanque où Gé (dit Scratch) nous montre tout son talent dans la mauvaise foi picarde, ou plus récemment notre petit périple madrilène avec en point d'orgue le bbike ou le mariage de Ju... Je n'oublie pas non plus ces moments de rire avec les blagues volontaires de Ju, les blagues involontaires de Fran et les blagues

internationales de Gé (« Whaaaaaaaaaaaaaaaaat ? »). Même si nous ne nous voyons plus tous les jours, vous êtes toujours là et ce, en toutes circonstances. Un réel et sincère merci les amis. Fran, je souhaite te remercier tout particulièrement. Tu as été là pendant plus de deux années de thèse et trois ans de football réel comme virtuel. Que ce soit personnellement ou professionnellement, tu as toujours été présent et disponible. Même si je n'adhère pas à l'ensemble de tes idées picardes (appeler de simples crêpes au jambon et au fromage, des ficelles picardes, c'est aberrant), tu m'as énormément apporté. Merci mon ami.

Merci aussi au gros CDCL Zizou et au Captain Saumon (aka Gérald) pour ces bonnes soirées au Panama à constater que Fran adore leurs tonneaux ou que d'autres préfèrent la spéléologie ou pratiquer l'allemand... Bien sûr, il y a aussi les très bons moments avec vous trois et l'US Clapiers. Même si la victoire n'a pas toujours été au bout, cela fait partie de mes plus belles années footballistiques. Merci les copains.

Ne t'inquiète pas Charlotte, je ne t'oublie pas ma grosse. Tu m'as soutenu dans les bons et dans les (très) mauvais moments professionnels comme personnels. Merci d'avoir été là pour me contredire et me faire chier, pour rire à mes blagues mais aussi pour avoir poussé la chansonnette avec moi dans la voiture en rentrant de Nice ou en allant aux Doctoriales (Axelle Red n'a qu'à bien se tenir). Tu as été ma véritable « pote de fin de thèse ». Merci pour ces très bons moments (elles disent toutes ça).

Merci aussi à toi Becman. Même si ton humour est aussi lourd que ton nez (spécialement lorsque j'essaie de me concentrer pour écrire mon manuscrit), tu m'as quand même sacrément fait rire. Il est loin le temps où tu étais tout timide en Master 1 et ne répondais que « Ok pour moi » à chacune de mes propositions. Non mais Alex, merci pour ces bons moments.

Bien évidemment, merci aussi à ma mamie Débo. Tu as souvent été là pour discuter avec moi, m'écouter me plaindre (oui c'est arrivé), me conseiller ou me remonter le moral. Un vrai merci. Tu as toujours été de bons conseils. Et surtout merci aussi d'avoir supporté les gamineries de Charlotte. J'ai essayé de la tempérer et de la raisonner mais tu la connais, c'est impossible...

ZhonZhong, we lived this crazy PhD study together. You are a fucking wang ba dan. But, as you are able to kill me by throwing cards, I prefer to say "Thank you Doctor Z".

Merci aussi à ma maman orque Lili pour ton soutien au début de thèse et pour les excellents moments partagés avec Scratch dans notre bureau à l'UFR ou avec Gégé en rentrant de soirée chez toi.

Je souhaite également vous remercier : Loïc pour avoir partagé mon attrait pour l'échelle de Bristol et mes expériences personnelles à EuroMov ; Cécile pour m'avoir supporté dans cette dernière année de thèse (je te laisse seule avec Alex dans le bureau, bon courage !); Thibaud pour nos petits points mode et rasage ; Monseigneur Métrot pour les moments sportifs (futsal et tennis ballon), gastronomiques (McDo et burgers) et culturels (TLMVPSP) passés ensemble mais aussi pour avoir été à l'origine de la majorité des jeux au sein du laboratoire (et

surtout tu as amené un peu de finesse et de raffinement bourguignon qu'il manque cruellement ici) ; et à tous les anciens doctorants du labo avec qui j'ai partagé une partie de ces années. Merci aussi à Kjerstin, Julien L. et Sofiane pour vos aides respectives sur la partie scientifique et sur la manière d'appréhender le doctorat et la suite. Et merci également à toutes les personnes qui sont arrivées sur la fin et qui m'ont motivé et aidé pour la dernière ligne droite.

Je souhaite également te remercier François B. Tu es celui qui m'a donné envie de faire de la recherche et qui m'a fait venir à Montpellier. Tu m'as apporté les bases de la recherche, tu m'as accompagné pendant 2 ans et plus. Et même si tu n'as pas participé directement à l'élaboration de ce travail, il a en partie été réalisé grâce à toi et la formation que tu m'as donnée. Merci.

Enfin merci à toi Mo. Même si cela ne s'est pas terminé comme prévu, je ne pouvais pas écrire ces remerciements sans te citer. Cette thèse est indissociable de toi. Tu as toujours été présente, tu m'as plusieurs fois relevé et remotivé... Je n'aurais sans doute pas eu le courage de terminer si tu n'avais pas été là. Merci pour tout, à toi et à ta famille...

Je souhaite rendre honneur à deux associations qui me tiennent à cœur : l'EFEC et l'éphémère EGEAC. Merci aux différents membres et à la direction de ces associations (dont le Président émérite Mr Métrot) qui a organisé d'une main de maître plusieurs événements sportifs internationaux. Le Canon Olympien y a d'ailleurs montré tout son talent en remportant le tournoi de jorky-ball 2015 (oui oui), et ce même blessé. Merci aussi à vous la fine équipe de TLMVPSP pour les heures passées à enrichir notre culture et à retarder la reprise du travail de l'après-midi. Merci enfin à toi Gueugnalex pour ces belles après-midis et soirées sur FIFA 13/14/15. Tu es sans doute le Pep Guardiola de demain. Mener le DFCO et le FCNA sur le toit de l'Europe reste quand même une sacrée performance. Certes, tout n'a pas toujours été rose, mais nous avons quand même réussi cette extraordinaire performance ensemble (et presque sans jamais recommencer un seul match !). Merci.

Pour terminer, je souhaite remercier toutes les personnes impliquées dans le projet européen AlterEgo avec qui j'ai partagé de bons moments scientifiques et de détente, et découvert de nouveaux pays et cultures. Je pense notamment à vous Cathy, Ed, Francesco, Stéphane et autres ...

Bien évidemment, je ne peux terminer ces remerciements sans une pensée pour mes trois directeurs. Au delà des compétences scientifiques que j'ai pu développer à vos côtés, vous m'avez tous les trois fait grandir en tant que personne. Merci à vous.

Plus précisément, merci à vous Benoit et Ludovic pour avoir été là et m'avoir aiguillé. Merci de m'avoir accepté en thèse sur ce projet alors que je ne venais pas du tout de cette thématique, d'avoir cru en moi, de m'avoir accordé du temps aussi bien au laboratoire qu'en dehors pour discuter et me rassurer. Tout n'a pas toujours été

facile au cours de cette thèse, mais malgré cela, vous m'avez souvent fait confiance et aidé au maximum. Merci.

Robin, tu n'es pas officiellement un de mes directeurs, mais dans les faits tu l'as largement été. Bien sûr, tu m'as quelquefois énervé à procrastiner, à sans cesse partir sur des méthodes improbables que toi-même ne maîtrisais pas, ou encore à mettre les 24h de rire de Gérard Depardieu ou de Petit poney pendant une réunion. Malgré cela, tu m'as toujours accompagné aussi bien d'un point de vue professionnel que personnel. Merci d'avoir mis ta casquette de psychologue et d'avoir pris le temps de m'écouter, de me rassurer, de me remonter le moral et d'essayer de me faire prendre confiance en moi (chose pas évidente, tu l'as constatée). Merci aussi pour tous les bons moments passés à Minneapolis, Budapest ou Moliets-et-Maa. Tu es devenu au cours de ces 3 années et demi un ami. Merci Rob.

Enfin, merci aux membres du jury M. Philippe Gaussier, M. Ludovic Seifert et M. Johann Issartel d'avoir accepté de juger ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	12
CHAPITRE 1 - CADRE THEORIQUE	15
1. L'improvisation	17
1. 1. La notion d'improvisation	17
1. 1. 1. <i>Définitions et origines</i>	17
1. 1. 2. <i>Historique</i>	18
1. 1. 3. <i>Différents types d'improvisation</i>	19
1. 2. Les interactions sociales	20
1. 2. 1. <i>La communication</i>	21
1. 2. 2. <i>Définition des interactions sociales</i>	23
1. 2. 3. <i>Improvisation socio-motrice et interaction sociale</i>	24
2. Les paramètres de l'improvisation socio-motrice	28
2. 1. La créativité	28
2. 1. 1. <i>Définition et Généralités</i>	28
2. 1. 2. <i>Créativités artistique et ordinaire</i>	30
2. 1. 3. <i>Créativité comme phénomène émergent ?</i>	32
2. 1. 4. <i>Bases neuronales de la créativité</i>	33
2. 2. La coordination motrice	37
2. 2. 1. <i>Définition et Généralités</i>	37
2. 2. 2. <i>Approche cognitive et computationnelle des coordinations</i>	38
2. 2. 3. <i>Approche dynamique des coordinations</i>	40
2. 2. 4. <i>Limites et contraintes de ces paradigmes expérimentaux</i>	48
2. 3. Situations d'improvisation socio-motrice	51
2. 3. 1. <i>Les prémices</i>	51
2. 3. 2. <i>Effet de l'expertise en art</i>	53
3. Pathologies sociales et improvisation	57
3. 1. Définition et diagnostic	57
3. 2. Schizophrénie et créativité	59
3. 3. Schizophrénie et coordination	61
4. Questionnements et Hypothèses	64

CHAPITRE 2 - REVUE METHODOLOGIQUE	67
1. L'analyse de la créativité motrice	70
1. 1. La transformée en ondelettes.....	70
1. 2. L'index de complexité.....	73
1. 3. La vitesse et l'amplitude.....	74
2. L'analyse de la coordination motrice.....	76
2. 1. Signaux stationnaires et périodiques	77
2. 1. 1. <i>Causalité de Granger</i>	77
2. 1. 2. <i>Phase relative</i>	78
2. 1. 3. <i>Index de synchronisation et dwell-time</i>	82
2. 1. 4. <i>Comparaison de fréquences</i>	83
2. 2. Signaux non-stationnaires et/ou non-périodiques	84
2. 2. 1. <i>L'entropie de transfert</i>	84
2. 2. 2. <i>L'analyse en ondelettes croisées</i>	86
2. 2. 3. <i>Différences temporelles et différences de position</i>	88
2. 2. 4. <i>L'analyse de quantification de récurrence croisée</i>	91
3. Conclusion.....	94
 CHAPITRE 3 - IMPROVISATION & ACQUISITION	 97
1. Introduction	99
2. Méthode.....	101
2. 1. Participants	101
2. 2. Set-up expérimental.....	101
2. 3. Procédure expérimentale	102
2. 3. 1. <i>Sessions d'exposition</i>	102
2. 3. 2. <i>Sessions de test : jeu en miroir</i>	104
2. 4. Traitement des données	105
2. 4. 1. <i>Sessions d'exposition</i>	105
2. 4. 2. <i>Sessions de tests : jeu en miroir</i>	106
3. Résultats	108
3. 1. Sessions d'exposition	108
3. 2. Sessions de tests : jeu en miroir.....	110
3. 2. 1. <i>Comportement novice</i>	110
3. 2. 2. <i>Evolution des compétences d'improvisation au cours du temps</i>	111

4. Discussion	112
CHAPITRE 4 - IMPROVISATION & POSTURE	117
1. Introduction	119
2. Méthode.....	121
2. 1. Participants	121
2. 2. Set-up expérimental.....	122
2. 3. Procédure expérimentale	122
2. 3. 1. <i>Situation Solo</i>	124
2. 3. 2. <i>Situation Duo</i>	125
2. 4. Traitement des données	125
2. 4. 1. <i>End-effecteur</i>	125
2. 4. 2. <i>Posture</i>	126
3. Résultats	128
3. 1. Situation Solo	128
3. 1. 1. <i>End-effecteur</i>	128
3. 1. 2. <i>Coordination posturale</i>	129
3. 2. Situations Solo vs. Duo.....	131
3. 2. 1. <i>End-effecteur</i>	131
3. 2. 2. <i>Coordination posturale</i>	131
4. Discussion	133
CHAPITRE 5 - IMPROVISATION & SCHIZOPHRENIE	138
1. Introduction	140
2. Méthode.....	142
2. 1. Participants	142
2. 2. Set-up expérimental.....	142
2. 3. Procédure expérimentale	143
2. 3. 1. <i>Essais Meneur</i>	144
2. 3. 2. <i>Essais Suiveur</i>	145
2. 4. Traitement des données	146
2. 4. 1. <i>Essais Meneur</i>	146
2. 4. 2. <i>Essais Suiveur</i>	146
3. Résultats	147
3. 1. Essais Meneur.....	147

3. 2. Essais Suiveur.....	149
4. Discussion	149
CHAPITRE 6 - DISCUSSION GENERALE	154
1. Méthodes et outils d'analyse.....	157
2. Conceptualisation de l'improvisation	159
3. Interactions sociales et communication non-verbale	163
4. Pathologie et réhabilitation	167
5. Limites et perspectives.....	169
BIBLIOGRAPHIE.....	174

Introduction générale

« *Pour réussir, il ne suffit pas de prévoir. Il faut aussi improviser.* ». Cette citation, tirée de l'œuvre de science-fiction « Fondation » écrite par Isaac Asimov en 1966, a un côté philosophique. Elle laisse place à la subjectivité et à l'interprétation de chacun tout en maintenant une idée constante : l'importance de l'improvisation. Mais qu'est ce que l'improvisation et en quoi peut-elle nous permettre de réussir?

Le mot « improvisation » prend tout son sens dans les activités d'arts comme la peinture, la musique, le théâtre ou encore la danse. Par exemple, nous avons déjà tous vu un danseur ou un comédien improviser seul. Plus précisément, nous avons également déjà tous vu plusieurs danseurs ou comédiens improviser ensemble. C'est ce dernier type d'improvisation – appelé *improvisation socio-motrice* – qui nous intéresse particulièrement dans ce travail. Contrairement à l'improvisation réalisée par un seul individu qui ne repose que sur ses capacités de créativité, l'improvisation socio-motrice nécessite, en plus, la coordination entre les différents acteurs. Cette improvisation implique ainsi la création d'actions entre plusieurs personnes sans préparation aucune. Lorsqu'ils improvisent, les danseurs créent, par exemple, des déplacements, des mouvements tout en prenant en compte les mouvements de l'autre, et ainsi se synchronisent ou se coordonnent entre eux.

Cette propension à la créativité et à la coordination de mouvements ne se limite pas seulement aux activités d'art, mais est belle et bien présente dans les interactions sociales quotidiennes. En effet, lorsque deux personnes discutent ensemble, elles créent des mouvements afin d'accompagner leurs discours. Ces mouvements ne sont pas écrits à l'avance, mais s'adaptent en fonction de notre discours et des mouvements de l'autre personne. Spontanément, ces mouvements s'effectuent de manière coordonnée entre les personnes interagissant. Lorsque deux personnes collaborent à l'atteinte d'un but conjoint, par exemple déplacer un meuble, elles doivent également créer des actions communes, non prévues à l'avance, en coordonnant leurs mouvements. Ainsi, il ne suffit pas de prévoir les interactions avec quelqu'un pour les réussir, il faut aussi savoir improviser. Bien que la citation d'Asimov date de 50 ans, peu de travaux se sont depuis intéressés à ce phénomène d'improvisation socio-motrice.

Aussi, nous proposons dans cette thèse d'investiguer les interactions sociales dyadiques au travers de l'improvisation socio-motrice. Ce travail a pour principal objectif d'apporter un regard nouveau sur les interactions sociales, en s'interrogeant notamment sur l'impact de l'improvisation sur le comportement moteur intra- et

interpersonnel, en présence ou non de déficits sociaux tels que le trouble du spectre autistique, la schizophrénie ou la phobie sociale.

La première partie de ce manuscrit (i.e., Chapitre 1), rédigée sous la forme d'une revue de littérature, est consacrée au phénomène d'improvisation, à sa définition et à sa compréhension dans un cadre théorique scientifique fort, en passant par son influence dans nos interactions quotidiennes. Nous verrons que la créativité et la coordination permettent d'évaluer cette improvisation et semblent altérées par la présence d'une pathologie sociale comme la schizophrénie.

La seconde partie du manuscrit, composée de quatre chapitres, développe les contributions expérimentales réalisées au cours de cette thèse. Dans un deuxième chapitre, nous recensons les principales méthodes d'analyse de la créativité et de la coordination connues et employées à l'heure actuelle, et en proposons de nouvelles. Dans un troisième chapitre, nous nous focalisons tout d'abord sur les comportements moteurs impliqués dans l'improvisation socio-motrice en évaluant les capacités d'improvisation de sujets sains dans différentes conditions. Nous tentons également de comprendre sur quoi repose l'acquisition de ces capacités. Dans un quatrième chapitre, nous évaluons les conséquences de l'improvisation sur le comportement moteur intra-personnel, et plus particulièrement sur la posture, prépondérante dans le maintien et le succès des interactions sociales. Nous analysons ainsi la stabilité posturale dans une tâche d'improvisation afin d'évaluer la posture dans un contexte social plus complexe que ceux reportés dans la littérature. Dans un cinquième chapitre, nous mesurons l'improvisation socio-motrice en présence d'une pathologie sociale telle que la schizophrénie. Cette maladie mentale est reconnue pour entraîner des déficits d'interaction sociale. Nous évaluons l'impact que peut avoir cette pathologie sur les capacités d'improvisation, et apportons un regard nouveau sur le déficit d'interaction sociale présent dans cette pathologie. Enfin dans un sixième et dernier chapitre, nous discutons l'ensemble de ces résultats expérimentaux ainsi que les considérations méthodologiques et théoriques que ceux-ci engendrent.

Chapitre 1

Cadre Théorique

1. L'improvisation

Afin d'étudier l'improvisation dans le cadre des interactions sociales quotidiennes, il est indispensable de s'intéresser au préalable à la définition même de cette notion, mais aussi à ses origines et à son historique. Comprendre son fonctionnement et les bases sous-jacentes qui lui sont propres semble indissociable des aspects artistiques de l'improvisation. L'objectif de cette partie est d'utiliser l'improvisation artistique comme outil de description de l'improvisation afin d'en ressortir les propriétés et paramètres inhérents à celle-ci, puis d'en faire le parallèle avec les interactions sociales humaines.

1. 1. La notion d'improvisation

1. 1. 1. Définitions et origines

Le verbe « improviser », apparu dans la langue française en 1642, vient du verbe latin *providere*. Celui-ci, provenant du verbe *video* dont le sens renvoie à « voir, apercevoir ou concevoir » et du préfixe *pro-* désignant « par avance, à l'avance », signifie « prévoir ou réaliser une action préméditée ». Le préfixe *im-* représentant le caractère privatif, le mot « improviser » signifie donc « composer sur-le-champ et sans préparation. » Le nom « improvisation », apparu seulement en 1807, témoigne ainsi d'une action qui n'a pas été conçue à l'avance. Tyler and Tyler (1990) ont d'ailleurs défini l'improvisation comme « la négation de la prédiction de faire basée sur la connaissance et le contrôle du passé » mettant d'autant plus en avant l'absence de préparation et de conception en amont de l'action. Cette absence de préparation de l'action avant son exécution est un paramètre clé de l'improvisation. Jean-François de Raymond (1980) propose quant à lui une vision plus détaillée de l'improvisation qu'il définit « comme l'acte qui contracte dans l'instant ce qui s'étale habituellement entre la conception (ou la composition) et l'exécution ultérieure ; le délai entre les deux étant supprimé par l'immédiateté de cet acte. L'improvisation est une réponse mais aussi une pratique inventive immédiate où l'individu cherche à atteindre un objectif par la mise en œuvre des seuls moyens alors disponibles. » Cette définition apporte ainsi une connotation artistique essentielle pour comprendre ce phénomène d'improvisation.

1. 1. 2. Historique

La notion d'improvisation renvoie généralement aux activités d'art telles que la musique, le théâtre ou la danse. En regardant de plus près l'histoire de ces arts, le moins que l'on puisse dire, c'est que l'improvisation a accompagné leur développement, mais aussi celui de la société en général. Dès le III^{ème} siècle avant J-C, un premier format de théâtre improvisé apparaît sous le nom de comédie atellane, puis reviendra en France au XV-XVI^{ème} siècle sous la forme de la *Commedia dell'Arte* venue d'Italie. Bien que le contexte soit défini en amont, donnant ainsi un cadre et une feuille de route aux comédiens, leurs mouvements ainsi que le contenu du texte ne sont, eux, pas définis, laissant libre cours aux capacités d'improvisation des comédiens. Souvent liée au contexte et aux problèmes de société et d'époque, l'improvisation jouit d'une bonne réputation jusqu'au XVII^{ème} siècle. A travers l'évolution de la société, la formalisation des activités d'art entraîne un retrait de l'improvisation laissant émerger des danses plus codifiées, telle que la danse classique. Cette transformation se retrouve également au niveau de la musique et du théâtre, devenant de plus en plus codifiés, impliquant ainsi une forte préparation.

L'improvisation redevient alors populaire avec l'apparition du jazz aux débuts des années 1900. Ce style musical repose sur les capacités d'improvisation des musiciens permettant leurs interactions. La création de nouvelles mélodies en fonction de leur ressenti et de leur humeur, est également primordiale dans ce style musical (Giddins, 1998). L'interaction avec le public est également importante et fonction des musiciens. Ainsi comme pour la *Commedia dell'Arte*, les musiciens ne jouent jamais exactement les mêmes chansons, les mêmes mélodies mais adaptent leur performance au contexte social et à leurs envies. Par la suite, la création de matchs d'improvisation, des compagnies professionnelles d'improvisation, d'écoles de théâtre d'improvisation et de la ligue professionnelle d'improvisation favorise l'essor de l'improvisation. L'apparition dans cette même période de la *danse-contact*, une des formes les plus connues de la danse post-moderne, en est un autre exemple. Cette danse, inspirée du jazz, repose sur la création de mouvements improvisés à partir de contacts physiques avec d'autres danseurs, mais aussi avec l'environnement (son ou sol par exemple). Elle implique ainsi un cadre précis de danse, mais laisse libre cours à l'improvisation des danseurs dans leurs mouvements (Novack, 1990). De nos jours, l'improvisation garde une place importante dans ces activités artistiques comme l'attestent les nombreuses

troupes de danses ou de théâtre basant leur spectacle sur ce concept. Pour certains, l'improvisation n'est pas seulement un style de théâtre : elle fait partie intégrante du spectacle, même s'il y a répétition au préalable.

“ Improvisation is fundamental to all drama. All performance uses the body of the actor, giving space and form to an idea, situation, character or text in the moment of creation. It does not matter that the play has been rehearsed for a month, with every move, every nuance of speech learned and practices. In the act of performance the actors becomes an improviser. ”

Frost and Yarrow, 1990 – Introduction – p.1

1. 1. 3. Différents types d'improvisation

De par son historique et ses origines artistiques, il semble pertinent de caractériser l'improvisation comme nécessitant (i) la présence d'un cadre et/ou d'un but prédéfini en amont et (ii) la création de comportements et actions d'individu(s) non préparés à l'avance. A l'aide des différents exemples détaillés dans la partie précédente, deux types d'improvisation sont à prendre en compte et à différencier.

Premièrement, l'improvisation n'impliquant qu'un seul individu. L'exemple le plus représentatif est celui du danseur à qui il est demandé d'improviser. Le cadre et le but sont bien prédéfinis (créer une nouvelle chorégraphie rythmée par exemple), mais la création et l'agencement des différents mouvements ne sont, eux, pas déterminés et reposent, au contraire, sur les capacités d'improvisation du danseur. Ce type d'improvisation a souvent été étudié à travers l'improvisation musicale. Beaucoup d'auteurs se sont intéressés à ce processus d'improvisation afin de comprendre comment et pourquoi un musicien était capable d'improviser une mélodie. Jeff Pressing a d'ailleurs écrit de nombreux articles sur l'improvisation musicale afin d'en comprendre sa survenue (1987, 1988, 1998). D'autres auteurs ont par la suite repris et développé ces idées (Abraham, 2014; Beaty et al., 2014). L'improvisation d'un seul individu repose principalement sur ses qualités de créativité, dont nous parlerons plus tard (cf. section 2. 1.), mais ne prend néanmoins pas en compte toutes les composantes de l'improvisation.

Secondement, il existe les situations d'improvisation à plusieurs. C'est le cas par exemple, d'un groupe de jazz ou de danseurs improvisant. Le cadre et le but sont, là aussi, définis à l'avance (créer une œuvre) et la production des actions des individus repose également sur les capacités de créativité de chacun. Toutefois, ce type d'improvisation dépend aussi de leurs facultés à interagir et à adapter leurs comportements avec ceux des autres personnes. Cette production de mouvements émerge ainsi spontanément en fonction des contraintes apposées aux protagonistes (ses propres émotions ou ses capacités d'actions par exemple) et à son environnement (les mouvements d'autrui ou le cadre prédéfini). Nous appelons ce type d'improvisation, *l'improvisation socio-motrice*, et la définissons comme la création d'une action de deux ou plusieurs personnes sans préparation préalable. Dans la suite du manuscrit, nous parlerons majoritairement de ce type d'improvisation.

Pour résumer, dans cette première section, l'improvisation est ici appréhendée à travers une perspective artistique. Plus spécifiquement, ce travail de thèse s'intéresse à l'étude de l'improvisation à plusieurs, appelée improvisation socio-motrice. Elle implique (i) la présence d'un cadre et/ou d'un but prédéfini et (ii) la création de comportements (moteurs) entre individus, et ce, sans préparation. Bien que les activités d'arts diffèrent des interactions sociales quotidiennes en terme de contexte (spectacle vs. vie quotidienne), de but (performance vs. fonctionnement) ou de moyens d'expression (illimités vs. encadrés), il semble évident que des situations d'improvisation se retrouvent également dans la vie de tous les jours, et précisément dans les interactions sociales. Avant d'aller plus loin dans cette démonstration, voyons à présent ce que signifie et implique la notion d'interaction sociale.

1. 2. Les interactions sociales

Les interactions sociales sont généralement perçues comme l'essence même de l'Homme. Dès l'Antiquité, les philosophes témoignent du caractère social de l'Homme. Aristote a notamment indiqué que « L'Homme est un être sociable; la nature l'a fait pour vivre avec ses semblables. » L'être humain vit en société et interagit avec ses concitoyens. A travers l'évolution humaine, les interactions sociales sont apparues comme indispensables à la survie et au bien-être de l'Homme. Elles caractérisent en effet un état sain et non pathologique. La communication joue, entre autres, un rôle

majeur dans ces interactions sociales dans le but de transmettre des informations entre les individus. Il apparaît donc important de s'intéresser, tout d'abord, à la notion de communication, primordiale dans ces interactions sociales, avant de définir les interactions sociales.

1. 2. 1. La communication

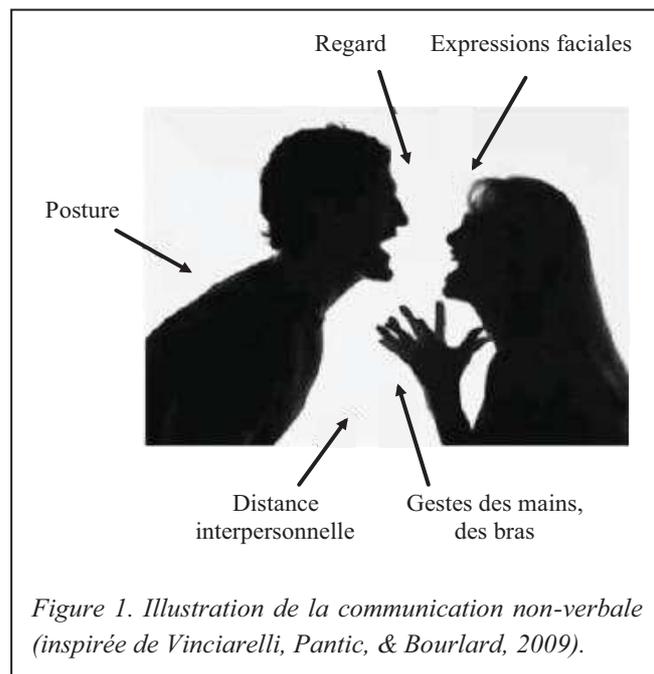
La communication peut être définie comme l'ensemble des processus physiques et psychologiques par lesquels s'effectue la mise en relation de plusieurs individus, en vue d'atteindre un objectif (Anzieu & Martin, 1968). Cette définition implique plusieurs composants importants : la présence de plusieurs acteurs et l'échange d'informations nécessaires à l'atteinte d'un but.

Dès les années 1950, la notion d'échange d'informations entre deux acteurs a été étudiée afin de mieux comprendre cette notion de communication. Un premier modèle a été introduit par Shannon et Weaver (1949). Ils ont exploré la communication au travers de la transmission d'information. Ce type de modèle, impliquant un émetteur envoyant un message à un récepteur qui le décode, n'a cependant pas été originalement conçu pour illustrer la communication humaine dans son ensemble. Il a plutôt mis en lumière la transmission d'un message indépendamment du contexte de la communication et de la dynamique des échanges. D'autres modèles ont justement été élaborés pour mieux s'adapter à la communication humaine, comme par exemple, le modèle de Wiener avec la mise en place du concept de « feedback » (Wiener, 1948). Cependant, ces modèles ne permettent pas de rendre compte de la complexité de la communication humaine et considèrent ces relations comme linéaires. A l'opposé, d'autres travaux, basés sur une approche plus psychosociale et comportementale, critiquent clairement l'idée d'un traitement de l'information linéaire et considèrent la communication comme une construction dynamique liée aux interactions entre les protagonistes (Bateson, 1955; Goffman, 1981; Newcomb, 1953; Picard, 1992). Contrairement aux auteurs précédents, ces derniers mettent l'accent sur l'environnement et le contexte de l'interaction, mais aussi sur son caractère spontané et non conscient. Ils considèrent que les troubles mentaux et psychiques peuvent être perçus comme un trouble de communication, d'interaction entre un individu et son environnement. Dans la lignée de ces travaux, la théorie de la cognition incarnée émerge. Cette approche critique l'idée que les actions du corps ne sont que les conséquences d'une intention mentale. Ils considèrent plutôt

que l'action fait partie intégrante du système, au même titre que la perception (Gibbs, 2006; Varela, Thompson, & Rosh, 1991). Ces différents travaux conçoivent la communication comme un couplage entre l'individu et son environnement, mais également comme une interaction sociale dynamique où les protagonistes s'influencent mutuellement.

Bien que le langage soit un canal de communication privilégié dans le but de transmettre de l'information, une communication basée sur les mouvements joue également un rôle important dans cette transmission d'informations. La communication peut ainsi se faire de plusieurs manières : (i) une *communication verbale* transmise par le discours, (ii) et une *communication non-verbale* véhiculée par tous les mouvements produits durant l'interaction. Cette dernière désigne toutes formes de communication sans parole et inclut aussi bien les expressions faciales que les gestes co-verbaux accompagnant le discours comme la posture, les mouvements des bras ou de la tête. Prenons un exemple pour mieux comprendre l'importance de la communication non-verbale (Figure 1). Lorsque nous regardons cette image, la communication verbale est

inexistante et pourtant il est quand même possible de capturer certaines informations permettant de comprendre le contexte général de la scène, le statut et les liens entre les protagonistes. Dans cet exemple, les expressions faciales, la posture et les gestes des mains semblent indiquer une situation de dispute. La proximité entre ces deux personnes ainsi que leurs supposés regards laissent à penser qu'il s'agit d'un couple. La



communication non-verbale apparaît ainsi jouer un rôle primordial dans la transmission d'informations durant les interactions sociales, et serait aussi importante que la communication verbale (Riggio & Feldman, 2005).

1. 2. 2. Définition des interactions sociales

Les interactions sociales humaines se définissent ainsi par un échange réciproque d'informations entre plusieurs individus à travers les différentes voies de communication (Brunet, Donnan, McKeown, Douglas-Cowie, & Cowie, 2009; De Jaegher, Di Paolo, & Gallagher, 2010; Goffman, 1961). La qualité de communication durant les interactions sociales dépend ainsi des comportements verbaux et non-verbaux, mais aussi des émotions des individus (Kopelowicz et al., 2006; Liberman, DeRisi, & Mueser, 1989) Ces facultés d'interaction interviennent de manière très précoce puisque, dès la naissance, des partages d'expressions faciales et de vocalisations sont généralement observés (Meltzoff & Moore, 1977). Elles se développent et s'acquièrent également avec les expériences de socialisation. Une interaction sociale ne nécessite pas seulement la présence d'une autre personne, mais demande une attention commune et partagée dans l'atteinte volontaire d'un but. Cette attention peut être : (i) *mutuelle* comme dans le cas d'interactions dyadiques, incluant un partage direct et mutuel de comportements et d'émotions entre deux personnes ; (ii) ou alors *conjointe* dans le cas d'interactions triadiques lorsque deux personnes interagissent autour d'un troisième objet de l'environnement (Tomasello, Carpenter, Call, Behne, & Moll, 2005; Trevarthen & Hubley, 1978). L'attention mutuelle entraîne une coordination dynamique entre les protagonistes de l'interaction (Conein, 1998; Goffman, 1961). Les interactions sociales induisent ainsi un lien entre la perception (souvent visuelle) et les comportements moteurs des individus, entre la perception et l'action. Dans la majorité des cas, ces interactions impliquent une action conjointe, c'est-à-dire une coordination spatiale et temporelle entre les protagonistes afin de produire un but commun et d'apporter un changement dans l'environnement (Knoblich, Butterfill, & Sebanz, 2011; Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006). Ce type d'interactions sociales est présent dans la vie quotidienne lors d'une discussion avec autrui, lorsque l'on marche avec quelqu'un ou lorsque l'on réalise tout simplement une action avec une autre personne.

Pour résumer, les interactions sociales reposent sur un échange réciproque d'informations véhiculées par différents canaux de communication (verbale ou non-verbale). À l'instar des situations d'improvisation artistiques décrites précédemment, les interactions sociales impliquent (i) la présence d'un cadre et/ou d'un but prédéfini et (ii)

la création conjointe de comportements (principalement moteurs) des protagonistes. Cette production motrice commune semble dépendante de l'environnement de l'interaction, et se réalise, dans la majorité des cas, sans préparation en amont. Ainsi, cette perspective des actions conjointes et des interactions sociales, plus généralement, semble particulièrement en adéquation avec la notion d'improvisation. Voyons à présent, s'il est possible de parler d'improvisation au sein de situations de la vie quotidienne.

1. 2. 3. Improvisation socio-motrice et interaction sociale

Plusieurs scientifiques de diverses thématiques ont comparé les situations d'improvisation en arts et certaines situations d'interactions sociales. C'est le cas par exemple du monde entrepreneurial, et précisément, celui de l'innovation de produit. Généralement, l'innovation de produit se fait en groupe de travail dans lequel les intervenants travaillent conjointement pour réaliser un but. De manière intéressante, certains chercheurs ont fait le parallèle entre cette situation et l'improvisation où un cadre précis dans lequel l'expression des individus dépend de leurs qualités de création et de collaboration entre eux (Pina e Cunha, Vieira da Cunha, & Kamoche, 1999; Vera & Crossan, 2005). L'expression du travail de groupe émerge en fonction des uns et des autres et de l'environnement commun. Basés sur l'improvisation en jazz, ils ont ainsi introduit le concept d'*improvisation organisationnelle* afin de comprendre et appréhender au mieux les éventuels problèmes inhérents à ce type d'interactions sociales (Kamoche & Pina e Cunha, 2001; Weick, 1998). Un autre exemple est rattaché au milieu de l'éducation. Plusieurs auteurs affirment que l'enseignement doit être perçu et vécu comme une performance d'improvisation (Erickson, 1982; Sawyer, 2004, 2011). Concevoir l'enseignement comme improvisation peut paraître étonnant mais pourtant, cela n'a rien d'aberrant. En effet, enseigner ne repose pas uniquement sur les capacités intellectuelles de l'enseignant, mais dépend également de l'interaction entre les étudiants et l'enseignant. Cette interaction émerge spontanément, rendant le déroulement de l'enseignement imprévisible. Bien qu'un cadre défini soit présent (i.e., le but du cours par exemple), les comportements moteurs et verbaux de l'enseignant et des étudiants émergent, quant à eux, en fonction des comportements d'autrui et de l'environnement. Cela nécessite ainsi une certaine créativité de la part des acteurs, et plus particulièrement de l'enseignant, afin de pouvoir s'adapter et répondre

positivement aux aléas du cours. D'ailleurs, il a été montré que les enseignants expérimentés préparaient moins leurs cours, donnant lieu à une part d'improvisation plus importante (Berliner & Tikunoff, 1976).

Finalement, plusieurs auteurs et anthropologues assurent que l'improvisation joue un rôle critique et prépondérant durant la vie quotidienne d'un individu (Agre & Chapman, 1987; Blom & Chaplin, 1988; Sawyer, 2001).

“ Situations from daily human interaction have parallels in improvisation. In daily life, the listener moves in time to the speaker's speech pattern. In dance improv, the less assertive person of a duet accommodates in movements to the more assertive partner. In daily life, shared opinions result in shared postures or movement qualities. In dance improv, the performer mirrors or shadows movement or shares its quality or basic design. ”

Blom & Chaplin, 1988 – Chapitre 1 – p.6

En effet, lorsque nous interagissons avec une autre personne, nous improvisons constamment. Cette improvisation socio-motrice se produit lorsque deux personnes communiquent et partagent un but commun tel que marcher côte-à-côte, discuter ou déplacer un meuble ensemble (Nachmanovitch, 1990; M. J. Richardson, Marsh, & Baron, 2007; Sawyer, 2001; Shockley, Richardson, & Dale, 2009). Durant ces interactions et comme dans le jazz ou dans la danse d'improvisation, le contexte de l'interaction est défini en amont, mais les communications verbale et non-verbale des individus ne le sont pas. Par exemple, discuter ou déplacer un meuble correspond au contexte défini en amont, mais les comportements (moteurs) produits par les acteurs de cette interaction reposent, eux, sur leurs facultés à improviser. Comme deux danseurs qui improvisent, les individus vont ainsi créer des mouvements, des actions, en fonction de ceux d'autrui et de leur environnement en général. La créativité des protagonistes est ainsi mise en jeu durant ces interactions sociales afin d'atteindre le but escompté, mais aussi pour s'adapter aux aléas de la situation. Il est, en effet, nécessaire d'adapter continuellement son comportement en fonction de l'environnement et des autres personnes pour maintenir une interaction sociale réussie (Ekman & Friesen, 1969). En

d'autres mots, les protagonistes de l'interaction coordonnent leurs gestes et leurs paroles afin de ne pas se couper la parole (i.e., « turn-taking ») ou ne pas faire tomber le meuble qu'ils portent, par exemple. Cette coordination joue un rôle essentiel dans la qualité des interactions sociales, en facilitant la communication entre les deux individus et donc le succès de l'interaction (Clark, 1996; Goldin-Meadow, 1999; Krauss, Chen, & Chawla, 1996).

À travers ce dernier paragraphe, nous avons pu observer différents exemples démontrant que l'improvisation socio-motrice pouvait non seulement rendre compte des interactions sociales quotidiennes mais en constituait l'essence même. Dans le but de pousser plus loin le raisonnement, il semble, à présent, intéressant de savoir comment cette improvisation peut être mesurée. Deux paramètres, présents aussi bien dans l'improvisation artistique que quotidienne, semblent particulièrement intéressants afin de rendre des capacités d'improvisation des individus : la créativité motrice et la coordination entre les individus.

Résumé

Inspirée des activités artistiques, l'improvisation socio-motrice, c'est-à-dire à plusieurs, implique (i) la présence d'un cadre prédéfini et (ii) la création d'actions communes des protagonistes, sans préparation en amont.

Les interactions sociales (quotidiennes), définies par un échange réciproque d'informations entre plusieurs individus dans un but généralement défini en amont, semblent pouvoir être illustrées à travers l'improvisation socio-motrice.

La communication au sein des interactions sociales repose, entre autres, sur la création de mouvements des individus et sur la coordination entre ces mouvements afin d'atteindre le but de l'interaction et pour s'adapter aux aléas de la situation.

La créativité des acteurs, tout comme la coordination entre eux, semblent ainsi pouvoir témoigner des capacités d'improvisation socio-motrice des individus.

2. Les paramètres de l'improvisation socio-motrice

Nous avons vu précédemment que la communication non-verbale, c'est-à-dire les comportements moteurs jouaient un rôle essentiel dans le succès des interactions sociales. Afin d'étudier l'improvisation socio-motrice comme illustration des interactions sociales, il est ainsi fondamental de s'intéresser à ces comportements moteurs. Considérant que lors d'une interaction sociale, il s'agit de créer du contenu tout en assurant un bon échange d'informations produites, les capacités d'improvisation semblent pouvoir être capturées par (i) la créativité des mouvements produits durant l'interaction et (ii) par la coordination entre les mouvements des individus, c'est-à-dire, la coordination interpersonnelle. Nous allons, dans cette partie, investiguer plus en détail, ces deux paramètres de l'improvisation socio-motrice.

2. 1. La créativité

La notion de créativité a largement été investiguée au sein de la philosophie, de la psychologie et plus récemment des neurosciences. On ne dénombre pas moins de dix créativités différentes : artistique, culinaire, mathématique, littéraire ou encore stratégique... L'étude de la créativité n'est réellement apparue que dans les années 1950, et balaye un spectre de disciplines assez large. L'objectif de ce paragraphe n'est pas de dresser une liste exhaustive des travaux sur la créativité, mais d'essayer de comprendre ce concept et d'en obtenir une vision globale et pertinente.

2. 1. 1. Définition et Généralités

Nous considérons dans ce manuscrit la créativité « comme la capacité à réaliser une production qui soit, à la fois, nouvelle et adaptée au contexte dans lequel elle se manifeste » (Amabile, 1996; Lubart, 2005; Sternberg & Lubart, 1995). La production nouvelle témoigne, ici, du caractère imprévu et original de l'action. Cette production peut s'avérer être une complète innovation ou alors une légère modification de précédentes productions (Sternberg, Kaufman, & Pretz, 2002).

Cette définition convient aussi bien à un cadre artistique qu'à un cadre non-artistique. Lorsque plusieurs musiciens ou danseurs improvisent, ils créent de nouvelles actions (i.e. mélodie ou chorégraphie) en fonction de leur environnement, dans le but

d'atteindre leur objectif (Berliner, 1994; Blom & Chaplin, 1988; Carter, 2000; Walton, Richardson, Langland-Hassan, & Chemero, 2015). Dans leur ouvrage sur l'improvisation en danse, Blom & Chaplin (1988) indiquent, en effet, que la créativité est un composant clé de l'improvisation. Lorsque les danseurs improvisent, ils créent de nouveaux mouvements en fonction du rythme de la musique, de leurs partenaires de danse ou encore de leurs propres émotions et envies. D'ailleurs, les professionnels de danse (danseurs, coaches ou chorégraphes) rapportent souvent que la capacité d'improvisation est exprimée par la propension des artistes à être créatif. Il est par exemple indiqué, dans le Bulletin Officiel spécial n°5 du 19 juillet 2012, qu'une production « maîtrisée de gestes simples » en danse équivaut au premier niveau de cotation. Une « production de gestes complexes maîtrisés » équivaut, quant à elle, au plus haut niveau de cotation de la chorégraphie au baccalauréat. Le même parallèle peut être fait pour l'improvisation en musique : la qualité d'une improvisation musicale est jugée à travers la faculté des musiciens à produire des séquences variées et riches (Badino, D'Ausilio, Glowinski, Camurri, & Fadiga, 2014; Berliner, 1994). Plus la séquence improvisée est riche et variée et meilleure est jugée l'improvisation.

Dans le cadre des interactions sociales (quotidiennes), les individus ne créent pas pour réaliser la meilleure performance possible, mais pour répondre à la situation et à son environnement. Dans ce contexte, la créativité repose essentiellement sur les mouvements produits durant l'interaction, c'est-à-dire sur la richesse du répertoire de mouvements produits. Cette richesse correspond à la complexité¹ des mouvements produits durant l'interaction, à leur variété. En d'autres termes, elle rend compte des différents mouvements, ou possibilités d'action que l'individu est capable de réaliser durant l'interaction. La richesse du répertoire de mouvement capture également la complexité de l'interaction. Par exemple, saluer de la main une personne n'implique pas la mobilisation d'un répertoire aussi important que de discuter tout en dansant avec une autre personne. En ce sens, saluer de la main une personne se réfère plutôt à une interaction sociale basique, alors que la seconde situation se réfère à une interaction sociale plus complexe. Par ailleurs, un lien direct peut être fait entre les mouvements que chacun réalise lorsqu'il interagit avec autrui et le succès de ces interactions sociales. En effet, une interaction sociale réussie s'accompagne d'un répertoire de mouvements

¹ La complexité se réfère ici au sens premier du terme, à savoir « qui comporte divers éléments » et non à sa définition provenant de la théorie du chaos en contrôle moteur. Dans la suite du manuscrit, cette définition première sera utilisée, sauf contre-indication.

riches durant cette interaction. Plus le répertoire de mouvements co-verbaux durant l'interaction est riche et plus la qualité de la communication et la compréhension des informations sont favorisées, facilitant ainsi les interactions (Burgoon, Newton, Walther, & Baesler, 1989; Krauss et al., 1996; Krauss, Dushay, Chen, & Rauscher, 1995). Un tel lien a aussi été observé avec des enfants souffrant de troubles autistiques pour lesquels le déficit d'interaction sociale est accompagné d'une production de mouvements réduite (Wing & Gould, 1979).

“ Tout mouvement de quelque nature qu'il soit est créateur ”

*Edgar Allan Poe, 1856 – Histoires Extraordinaires ;
Puissance de la Parole*

Durant ce travail de thèse, nous nous focalisons sur la créativité des mouvements produits durant l'interaction, c'est-à-dire la *créativité motrice*. La créativité motrice, témoignant de la richesse du répertoire de comportements, peut être capturée par la complexité et la variété des mouvements produits durant l'interaction. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à ce type de créativité. C'est pourquoi, les études citées dans les sections suivantes portent majoritairement sur la notion de créativité mais pas forcément sur cette notion de créativité motrice.

2. 1. 2. Créativités artistique et ordinaire

La créativité a longtemps été décrite comme purement élitiste et généralement artistique ou du moins fortement liée à une performance dans un domaine particulier (peinture, cuisine, danse, ou science par exemple). Ce premier type de créativité, appelé « *Big-C* » repose ainsi sur les actes de génies créatifs, tels que Mozart, Freud ou Picasso (Gardner, 2011; Simonton, 1994, 2004). L'une des motivations de ces chercheurs était de comprendre pourquoi la créativité de ces génies était si importante, comparée à la population lambda (Feist, 1998; Gardner, 1993; Guilford, 1950). Feist s'est notamment intéressé à la présence des cinq grands traits de personnalité chez ces individus, observés à l'aide du *Big-Five Inventory* (L. R. Goldberg, 1981), à savoir l'Extraversion, le Névrotisme, le caractère Agréable, le caractère Conscientieux et l'Ouverture aux expériences (adapté par Costa & McCrae, 1995). Il a ainsi observé ainsi que l'Ouverture

aux expériences est positivement corrélée aux personnes créatives alors que le caractère Consciencieux est négativement corrélé avec ces personnes-là. En d'autres mots, un génie créatif est à la fois autonome, ambitieux, impulsif, hostile et introverti tout en étant ouvert aux expériences. Des liens entre l'anxiété et la créativité ont aussi été suggérés (Carlsson, 2002), allant jusqu'à proposer que la créativité serait potentiellement liée à des pathologies mentales (Brod, 1997; Lauronen et al., 2004). Néanmoins, ces interprétations sont controversées et ne s'appliquent qu'à des génies créatifs et non à la créativité que chaque individu possède.

Un second type de créativité – appelé « little-c » – correspond, quant à lui, à la créativité ordinaire, c'est-à-dire présente chez tout être humain et observable durant la vie de tous les jours (Craft, 2001a, 2001b; Richards, 1990). Chaque individu possède un potentiel créatif qui lui est donné à la naissance (Maslow, 1954). Bien que cette conception ne soit pas acceptée par tous (i.e., la créativité étant plutôt considérée comme élitiste), ce type de créativité n'impliquerait pas d'être un génie créatif, mais illustrerait plutôt les capacités à faire face efficacement au changement présent durant les activités de vie quotidienne. Par exemple, cette créativité se retrouve lorsqu'un individu cuisine, dessine, écrit ou parle (Kaufman & Beghetto, 2009; Maybin & Swann, 2007) ou dans des situations plus spécifiques telles qu'en voiture, à la maison, à l'école ou au travail (Agars, Baer, & Kaufman, 2005; Beghetto & Plucker, 2006; Sawyer, 2004). L'improvisation organisationnelle, précédemment citée dans la section 1. 2. 3., implique par exemple ce type de créativité (Kamoche & Pina e Cunha, 2001). La créativité peut être mesurée au travers de questionnaires et échelles. Il en existe de nombreux, à l'image de la multiplicité des champs d'étude de la créativité. Alors que certains tests sont plus focalisés sur la créativité artistique (« *Creative Achievement Questionnaire* » de Carson, Peterson, & Higgins, 2005), d'autres essaient au contraire de mesurer la créativité dans sa globalité (« *Kaufman Domains of Creativity Scale* » de Kaufman, 2012; « *Revised Creativity Domain Questionnaire* » de Kaufman, Cole, & Baer, 2009; « *Evaluation du potentiel créatif* » de Lubart, Besançon, & Barbot, 2011). Les questionnaires se réfèrent notamment aux expériences comportementales de l'individu réalisées au cours des derniers mois. D'autres échelles se basent plutôt sur des tâches graphiques, verbales ou artistiques mesurant ainsi les comportements produits des personnes testées. Ainsi, la créativité semble pouvoir être perçue comme des réponses comportementales permettant, entre autres, de différencier les individus

créatifs des personnes qui ne le sont pas ou moins. Une question survient alors : comment est-il possible d'expliquer l'apparition de ces comportements créatifs ?

2. 1. 3. Créativité comme phénomène émergent ?

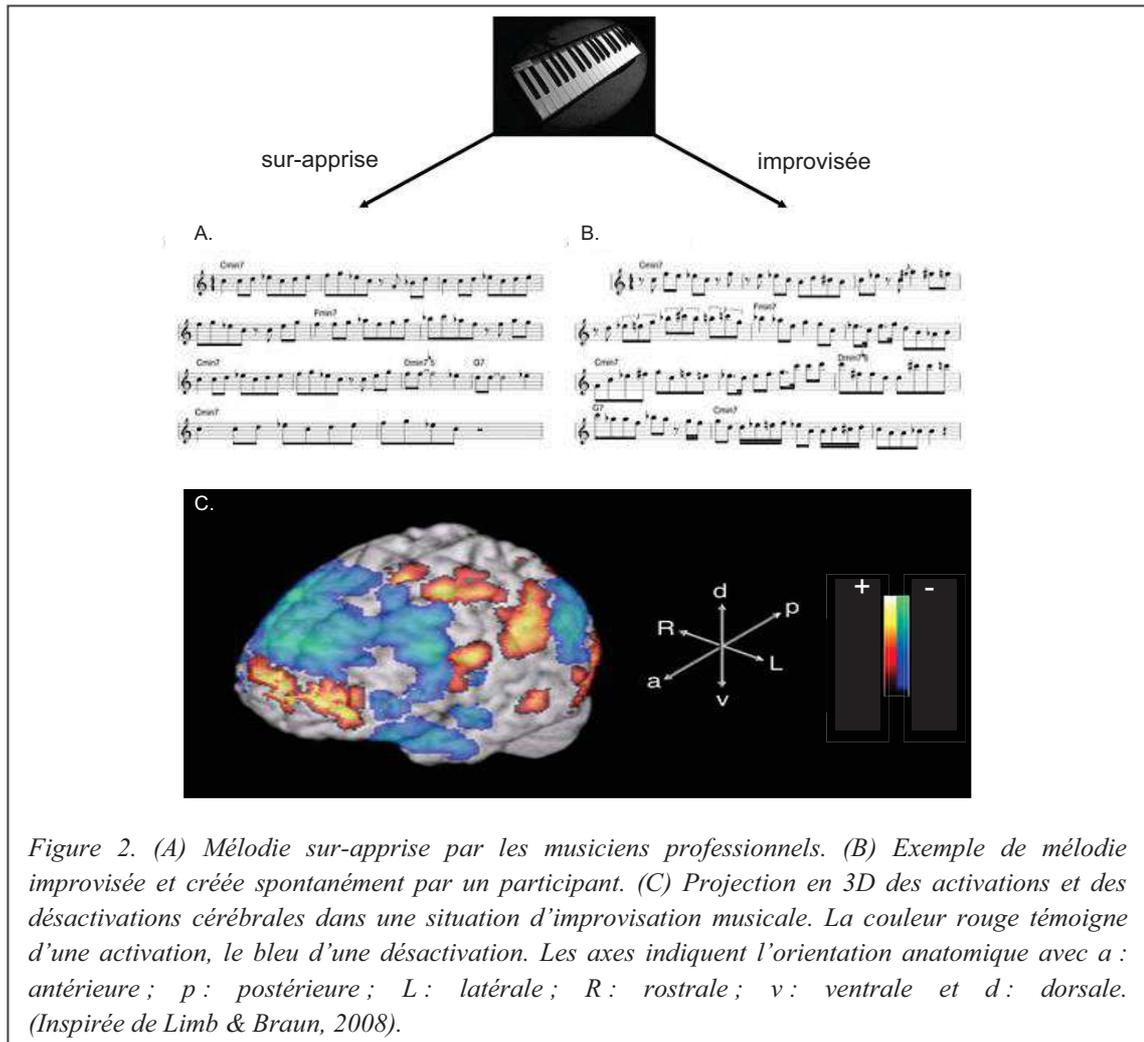
Il existe différentes manières d'expliquer l'apparition de l'acte créatif. Pour certains, elle repose principalement sur un traitement cognitif et réfléchi (Lubart, 2005; Wallas, 1926). Pour d'autres, elle serait plus dépendante de contraintes présentes dans l'environnement de l'individu (Baer & Oldham, 2006; Moreau & Dahl, 2005; Rosso, 2014). Cette dernière proposition conviendrait aussi bien à la créativité ordinaire que artistique. La présence de contraintes faciliterait ainsi l'émergence de la créativité. Elle serait fonction de contraintes liées à l'individu (ses traits de personnalités ou ses émotions par exemple), liées à la situation ou à la tâche à effectuer (en termes de temps ou de ressources) et liées à l'environnement (audience ou collaboration). Par exemple, la créativité entre plusieurs personnes est considérée comme un processus émergent d'une collaboration entre les personnes, et non des seules qualités de chaque acteur (Sawyer, 2003, 2006; Sawyer & DeZutter, 2009). Elle ne peut pas être uniquement expliquée par les actions de chaque individu, mais repose bien sur les interactions dynamiques entre les acteurs (i.e., « *le tout est supérieur à la somme des parts individuelles* »). Sawyer & DeZutter (2009) définissent cet aspect en quatre points : (i) la situation n'est pas écrite à l'avance mais est imprédictible ; (ii) chaque action des individus dépend des précédentes ; (iii) chaque action peut modifier l'interaction entre les acteurs ; (iv) et le processus est collaboratif où chaque acteur y contribue. Ces auteurs ont d'ailleurs investigué la créativité lors d'improvisation entre acteurs, en mesurant qualitativement les comportements verbaux et non-verbaux des acteurs à l'aide d'une analyse vidéo des séquences improvisées². Ils ont ainsi démontré que la création des personnages, des relations entre eux, de l'intrigue, mais également des comportements verbaux et non-verbaux émergeaient de la collaboration entre les acteurs. Des observations similaires ont été retrouvées durant un brainstorming, ou entre musiciens, danseurs et sportifs, et même au cours d'une simple discussion (Berliner, 1994; Hristovski, Davids, Passos, & Araújo, 2012; Paulus & Nijstad, 2003; Sawyer, 2001, 2003; Sawyer & DeZutter, 2009).

² Il s'agit de l'analyse d'interaction (« *interaction analysis* »). Pour plus de détails sur la procédure, voir Jordan & Henderson (1995) et Sawyer & DeZutter (2009).

Pour résumer, deux types de créativité sont observés : une créativité artistique et une créativité ordinaire. Bien qu'il existe des différences entre ces deux créativités, la présence de contraintes dans l'environnement, facilitant l'émergence de la créativité, permet d'expliquer ces deux sortes de créativité. Évaluée à l'aide de questionnaires et échelles, la créativité correspond généralement à des réponses comportementales particulières observées dans certaines situations (artistiques comme quotidiennes). Ces réponses ou signatures comportementales permettent de discriminer les personnes créatives d'individus peu ou pas créatifs. En ce sens, l'étude des mécanismes neuronaux permettant la survenue de la créativité semble intéressant dans le but de comprendre ces différences interindividuelles.

2. 1. 4. Bases neuronales de la créativité

Depuis plusieurs années maintenant, les scientifiques tentent en effet de comprendre les mécanismes neuronaux sous-tendant l'émergence de la créativité (Beaty, 2015; Dietrich & Kanso, 2010; Jung, Mead, Carrasco, & Flores, 2013). Comme indiqué précédemment, l'improvisation musicale d'un individu repose essentiellement sur sa capacité de créativité. En cela, elle peut être utilisée pour comprendre ce phénomène. Ces études se sont généralement focalisées sur des artistes professionnels en improvisation, tels que des musiciens en jazz, des musiciens classiques ou encore des rappeurs free-style (Bengtsson, Csikszentmihalyi, & Ullen, 2007; Limb & Braun, 2008; Liu et al., 2012). Une des premières études a notamment été menée par Limb & Braun (2008) sur six pianistes professionnels de jazz, habitués à improviser. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a été utilisée pour enregistrer les activations cérébrales durant l'improvisation. Les participants, couchés dans un IRMf adapté, devaient jouer une mélodie au piano sous plusieurs conditions. Soit ils jouaient une mélodie de jazz sur-apprise (Figure 2. A.), soit ils improvisaient et créaient une nouvelle mélodie de jazz (Figure 2. B.). L'utilisation de la séquence mémorisée permettait de s'affranchir des zones cérébrales activées durant la production d'une séquence non-improvisée. Les résultats observés par ces auteurs ont montré une activation du cortex préfrontal médian (CPFM) et une désactivation (c'est-à-dire une moindre activation) du cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) lorsque les musiciens improvisaient, comparativement à la séquence sur-apprise (Figure 2. C.).



La créativité serait ainsi observée par l'activation du CPFM, impliqué dans les processus auto-générés (stimulus indépendant), et par la désactivation du CPFDL, impliqué dans la planification des actions et dans l'attention portée sur l'environnement. Une désactivation du système limbique du musicien, dédié en partie aux émotions, serait également observée (Blood & Zatorre, 2001). Des résultats similaires ont été observés entre un rap d'improvisation et un rap sur-appris chez des rappeurs free-style experts (Liu et al., 2012). De surcroît, bien que certaines zones associées au contrôle moteur et cognitif soient activées durant l'improvisation, ces auteurs considèrent que la créativité implique l'inhibition du contrôle d'exécution des mouvements. Berkowitz and Ansari (2010) ont confirmé certains de ces résultats en montrant une désactivation des zones attentionnelles chez un musicien improvisant.

A l'inverse, ces zones attentionnelles seraient activées lorsqu'un musicien improvise avec une autre personne (Donnay, Rankin, Lopez-Gonzalez, Jiradejvong, &

Limb, 2014). Le paradigme utilisé, dans cette étude, était proche de celui décrit précédemment avec une condition sur-apprise et une condition improvisée. L'unique différence impliquait que l'expérimentateur, pianiste jazzman, jouait du piano avec le participant. Le sujet produisait une séquence puis l'expérimentateur jouait sa séquence, etc. Contrairement aux études précédentes, les auteurs ont observé une activation du CPFDL et une forte activation des aires classiquement associées au langage durant l'improvisation socio-motrice musicale. Les auteurs suggèrent que l'improvisation musicale à deux implique une certaine communication entre les acteurs, nécessitant une attention plus importante des participants à la mélodie jouée par autrui (Donnay et al., 2014).

A travers cette dernière section, nous avons pu nous rendre compte des mécanismes sous-jacents à la créativité. Bien évidemment, les aires sollicitées font partie d'un réseau où plusieurs régions interagissent ensemble de manière dynamique. Ainsi, plusieurs de ces réseaux seraient sollicités par la créativité : (i) un réseau lié aux processus attentionnels, (ii) un réseau lié aux processus contrôlés et cognitifs et (iii) un réseau stimulus-dépendant impliquant l'imaginaire. Finalement, les activations neuronales dépendent essentiellement du contexte, de l'environnement dans lequel l'improvisation s'opère. En effet, la présence d'autrui et les coordinations interpersonnelles impliquées modifient notamment ces activations neuronales, tout comme le comportement moteur.

Résumé

On définit la créativité comme la capacité à réaliser une production nouvelle et adaptée au contexte. Cette production repose sur le caractère original et imprévu de l'action. Qu'elle soit artistique ou quotidienne, la créativité peut être observée au travers de réponses comportementales discriminant les individus entre eux.

La créativité émerge de l'interaction entre les individus et dépend de contraintes propres à l'individu, de contraintes présentes dans l'environnement et au sein du contexte de la situation.

Dans le cadre de l'improvisation socio-motrice, la créativité est un paramètre important et observable dans les activités quotidiennes. Bien que peu investiguée, la créativité motrice, ou la richesse du mouvement, est toutefois particulièrement importante dans ces interactions sociales et dans leur succès.

Les bases neuronales tout comme les réponses comportementales indiquent que la créativité dépend aussi de la présence d'autres individus illustrant la survenue d'une certaine coordination entre ces individus.

2. 2. La coordination motrice

Nous nous intéressons, dans cette partie, au second paramètre de l'improvisation socio-motrice, à savoir la coordination motrice interpersonnelle. Avant de se focaliser sur la coordination entre les personnes et d'expliquer la survenue de ce phénomène, nous allons d'abord définir le terme de coordination et les notions qui lui sont propres.

2. 2. 1. Définition et Généralités

Le terme *coordination* se réfère à l'organisation d'éléments dans le temps et l'espace nécessaire afin de parvenir à un objectif commun. Il renvoie souvent à la notion de *synchronisation*. Ce terme illustre la réunion dans le temps et l'espace de plusieurs éléments. Les deux définitions étant proches, nous emploierons ces termes de manière interchangeable au cours de ce travail.

Dans une situation d'improvisation, les individus coordonnent leurs comportements, leurs mouvements afin de réaliser une action commune. Il a notamment été montré que lorsque plusieurs artistes improvisent ensemble, des comportements de parfaite synchronisation se produisent (Nachmanovitch, 1990; Seham, 2001). Cette parfaite synchronisation représente un état dans lequel chaque mouvement des acteurs semble être réalisé au bon moment et au bon endroit (Seham, 2001). Dans le cadre des interactions sociales quotidiennes, ce phénomène de coordination interpersonnelle est également présent. Il a par exemple été observé entre des mouvements posturaux, des mouvements des bras et des mains, mais aussi entre des mouvements oculaires (Condon & Ogston, 1966; LaFrance, 1982; Richardson & Dale, 2005; Shockley et al., 2009). La coordination interpersonnelle possède une fonction sociale puisqu'elle influence la réussite des interactions entre individus. De manière générale, la tendance des individus à se synchroniser ou à imiter spontanément les gestes, la posture, les expressions faciales et le discours de l'autre personne impliquée dans l'interaction agit comme une véritable « glue sociale » favorisant ces interactions et leurs succès (Branigan, Pickering, & Cleland, 2000; Chartrand & Bargh, 1999; Hove & Risen, 2009; Lakin & Chartrand, 2003; Lakin, Jefferis, Cheng, & Chartrand, 2003; Meltzoff & Moore, 1977; Schmidt & Richardson, 2008). Ces coordinations interpersonnelles promeuvent le sentiment d'affiliation, d'appréciation entre les acteurs (Bernieri, 1988; Kendon, 1970), les comportements pro-sociaux, altruistes et de coopération (Valdesolo & Desteno,

2011; van Baaren, Holland, Kawakami, & van Knippenberg, 2004; van Baaren, Holland, Steenaert, & van Knippenberg, 2003; Wiltermuth & Heath, 2009) et plus généralement les échanges sociaux (Lakin et al., 2003).

La survenue de tels phénomènes de coordination repose principalement sur les liens entre la perception sensorielle (souvent visuelle) et les comportements moteurs des individus, c'est-à-dire entre la perception et l'action. Plusieurs approches théoriques débattent à l'heure actuelle de la compréhension des processus perceptivo-moteurs sous-jacents aux coordinations. Afin d'obtenir une vision globale du phénomène de coordination, nous allons, dans un premier temps, décrire brièvement l'*approche cognitive et computationnelle* des coordinations. Puis dans un second temps, nous allons détailler l'*approche dynamique* des coordinations. Cette dernière perspective semble particulièrement adaptée à notre contexte d'improvisation socio-motrice pour laquelle l'émergence d'actions et de comportements se produit en fonction de contraintes présentes durant l'interaction (acteurs et environnement). Cette approche constitue ainsi les bases conceptuelles et le cadre d'interprétation de ce travail de thèse.

2. 2. 2. Approche cognitive et computationnelle des coordinations

Basée sur des perspectives cognitivistes et computationnelles³, cette approche s'intéresse particulièrement aux mécanismes par lesquels un stimulus social influence le traitement cognitif, c'est à dire le traitement cérébral d'un individu. Assez rapidement, plusieurs auteurs indiquent que la simple observation d'une action réalisée par autrui active les mêmes aires cérébrales que lors de l'exécution de cette même action (Jeannerod, 1984; Prinz, 1997). Cette pensée a été renforcée par la mise en évidence de « neurones miroirs » chez les primates. Présents dans le cortex pré-moteur ventral du singe, ces neurones possèdent la spécificité de s'activer aussi bien lors de l'exécution d'un geste, que lors de l'observation de ce même geste réalisé par autrui (di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese, & Rizzolatti, 1992; Gallese, Fadiga, Fogassi, & Rizzolatti, 1996; Rizzolatti & Craighero, 2004; Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996). Plusieurs études ont confirmé l'existence d'un système similaire de neurones miroirs

³ Ces perspectives reposent sur un contrôle "top-down" des mouvements, c'est-à-dire un contrôle hiérarchisé, avec la présence d'un prescripteur central envoyant une commande (i.e., entrée) observée en sortie, par le mouvement.

chez l'homme (Decety et al., 1997; Mukamel, Ekstrom, Kaplan, Iacoboni, & Fried, 2010). La présence des neurones miroirs renforce l'idée défendue par cette approche, consistant à accepter la présence d'un codage commun (au niveau cérébral) de la perception et de l'action. Une conséquence comportementale de ce codage commun se situe au niveau du système musculaire périphérique. Pendant l'observation d'une action, une augmentation de l'activité musculaire (i.e., potentiel évoqué moteur) du membre que l'observateur utiliserait pour réaliser cette même action, est retrouvée (Aglioti, Cesari, Romani, & Urgesi, 2008; Fadiga, Fogassi, Pavesi, & Rizzolatti, 1995; Gangitano, Mottaghy, & Pascual-Leone, 2001). L'activation musculaire, provoquée par l'observation d'une action, entraîne une *facilitation motrice* pour ce même mouvement (Fadiga et al., 1995). Cependant, dans le cas d'une action observée différente de celle réalisée, une interférence peut se produire entre la perception et l'action, engendrant une plus grande variabilité de mouvements du participant, que lorsque les mouvements observés et réalisés sont identiques (Gowen, Stanley, & Miall, 2008; Kilner, Paulignan, & Blakemore, 2003). Dans le cas d'interactions sociales ou d'actions conjointes plus complexes, les mêmes mécanismes permettraient de réaliser les coordinations interpersonnelles de par la présence d'un système représentationnel qui simulerait et prédirait les intentions et les actions d'autrui (Sebanz et al., 2006; Sebanz & Knoblich, 2009).

Bien qu'intéressante et pertinente, cette approche ne permet pas, à elle seule, de comprendre et d'expliquer les mécanismes sous-tendant l'émergence de ces coordinations interpersonnelles. Plus précisément, certains scientifiques de cette approche admettent que le codage commun seul ne permet pas d'expliquer les actions conjointes – « *common coding of perceived and performed actions alone is not sufficient to enable one to engage joint action* » (Sebanz & Knoblich, 2009; p. 353). De plus, il a été montré que le mécanisme de facilitation motrice, notion phare de cette approche, pourrait être expliqué par une vision plus comportementale et émergente (c'est-à-dire, sans prescription centrale) des interactions : l'approche dynamique des coordinations (Richardson, Campbell, & Schmidt, 2009).

2. 2. 3. Approche dynamique des coordinations

- *Définitions et origines*

Cette approche considère la coordination comme un phénomène de nature *auto-organisée* (Kelso, 1995; Kelso & Schöner, 1988; Kugler & Turvey, 1987). Le principe d'auto-organisation provient des sciences psycho-chimiques comme la thermodynamique (Haken, 1983). L'idée principale de ce concept est que tout système est composé d'une multitude de sous-systèmes interagissant les uns avec les autres. D'après cette théorie, la coordination d'un système émerge de l'influence mutuelle de différents sous-systèmes (e.g., nerveux, musculaire), composant par exemple le système neuro-musculo-squelettique (Bingham, Schmidt, Turvey, & Rosenblum, 1991). Ce système est composé de millions de connexions nerveuses, de centaines de muscles et d'os, entraînant une redondance de composants et de possibles interactions entre eux, au niveau microscopique. Malgré cela, la production motrice résultant de l'interaction entre ces sous-systèmes est simple, et s'exprime par l'émergence de formes, de patrons stables au niveau macroscopique. Ce phénomène d'auto-organisation apparaît spontanément afin de répondre aux contraintes appliquées à ce système (Newell, 1985, 1986). C'est l'interaction entre trois types de contraintes qui induit l'émergence de ces formes de coordination du système : (i) les *contraintes liées à l'organisme* se réfèrent aux propriétés intrinsèques de l'individu comme leur morphologie, l'expertise ou la pathologie, (ii) les *contraintes liées à la tâche* caractérisent l'objectif de la tâche ou du mouvement à réaliser pour réussir cette tâche et enfin, (iii) les *contraintes liées à l'environnement* représentent les contraintes « externes à l'organisme » comme le contexte dans lequel est réalisé la tâche (i.e., type de support, modification du champ visuel, etc.). Au final, l'émergence des formes, des patrons de coordination constitue une réponse du système aux déséquilibres créés par la présence et l'interaction de ces contraintes. L'organisation spatio-temporelle la plus stable émerge du système pour répondre à ces perturbations (Haken, 1983).

Ces phénomènes de coordination ont d'ailleurs été mis en évidence grâce aux travaux précurseurs de von Holst (1937/1973) sur la coordination entre les nageoires d'un poisson (Figure 3). Chaque nageoire correspond à un système différent pouvant interagir les uns avec les autres. Chacun de ces systèmes possède ses propres caractéristiques. En effet, lorsque les nageoires latérales et la nageoire dorsale sont immobilisées les unes après les autres, leurs fréquences naturelles de battements sont

différentes. Une fois libérées, les nageoires entrent en interaction. L'interaction entre ces sous-systèmes entraîne, au niveau macroscopique, une possible coordination entre les nageoires par l'adoption d'une fréquence commune de battement, et ce malgré la différence initiale de fréquences entre chaque nageoire. Trois types de coordination sont communément observés : (i) la *coordination absolue* lorsque les nageoires maintiennent la même fréquence commune, (ii) la *coordination relative* lorsque les nageoires se coordonnent uniquement de manière intermittente et (iii) une *absence de coordination* entre les nageoires (Figure 3).

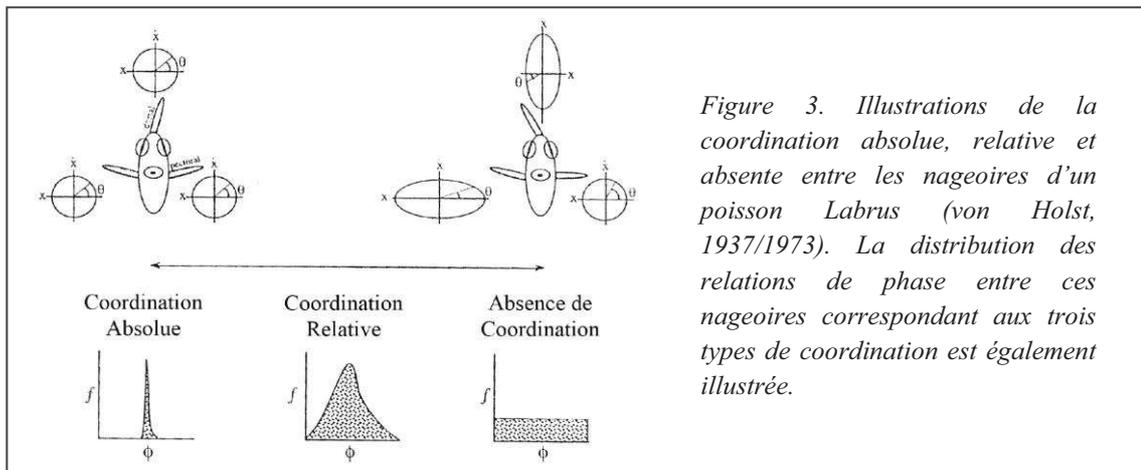


Figure 3. Illustrations de la coordination absolue, relative et absente entre les nageoires d'un poisson *Labrus* (von Holst, 1937/1973). La distribution des relations de phase entre ces nageoires correspondant aux trois types de coordination est également illustrée.

Ces travaux montrent pour la première fois l'émergence de coordination entre différents segments d'un être vivant. La présence de contraintes modifiant les interactions entre les composants d'un système fait émerger la coordination. Ces résultats laissent à penser que la coordination entre les membres d'un même individu, c'est-à-dire la *coordination intra-personnelle*, pourrait aussi être observée et expliquée de la même manière.

- *Coordination motrice intra-personnelle*

La coordination intra-personnelle a alors été investiguée sous l'approche des patrons dynamiques de coordination. Les scientifiques se sont d'abord focalisés sur la coordination bi-manuelle (Byblow, Chua, Bysouth-Young, & Summers, 1999; Kelso, 1984; Kelso, Holt, Rubin, & Kugler, 1981; Kelso, 1981), puis ils ont étendus leurs travaux sur la coordination entre les membres supérieurs et inférieurs d'un seul individu

(Baldissera, Cavallari, & Civaschi, 1982; Jeka & Kelso, 1995; Salesse, Temprado, & Swinnen, 2005).

Prenons l'exemple de la coordination entre les index d'un individu (Kelso et al., 1981; Kelso, 1981). Il était ici demandé aux participants de déplacer leurs index en réalisant des oscillations à fréquence commune. L'émergence de deux patrons stables de coordination apparaît: un patron de coordination en *phase* et un patron de coordination en *antiphase* (Kelso et al., 1981; Kelso, 1981). Afin d'évaluer cette organisation spatio-temporelle entre les deux index, la différence de phase entre les deux mouvements a été calculée. Cette variable – appelée *phase relative* (ϕ_{rel}) – témoigne de l'état du système à un instant donné et de sa dynamique. Un patron de coordination en phase, ($\phi_{rel} \approx 0^\circ$), se caractérise par des mouvements de doigts dans la même direction (i.e., activation simultanée des muscles homologues des deux index). À l'inverse, un patron de coordination en antiphase ($\phi_{rel} \approx 180^\circ$) représente des mouvements de doigts dans des directions opposées (i.e., activation simultanée des muscles non-homologues des deux index). La modification des contraintes, à l'aide d'un paramètre de contrôle, entraîne un changement de coordination entre les deux index. C'est le cas notamment de la fréquence de mouvements. Lorsque la fréquence des mouvements des doigts est augmentée et atteint une valeur trop importante (i.e., fréquence critique), une déstabilisation du patron en antiphase est observée, allant jusqu'au passage automatique de ce patron vers le patron en phase (Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Kelso, 1984). N'observant pas cette transition automatique du patron en phase vers le patron en antiphase lorsque la fréquence du mouvement est modulée, le patron en phase est alors considéré comme étant le plus stable, et ce quelque soit la fréquence du mouvement.

Afin de comprendre et d'illustrer l'émergence de coordination en fonction de contraintes, ces observations expérimentales ont également été modélisées. Ainsi, Haken, Kelso, et Bunz (1985) ont proposé un modèle, appelée *modèle HKB*, afin de prédire l'émergence de ces comportements reposant sur des propriétés dynamiques semblables à celles observées dans les systèmes d'oscillateurs couplés (Fuchs, Jirsa, Haken, & Kelso, 1996; Haken et al., 1985; Kelso, 1984; Schöner, Haken, & Kelso, 1986). Chaque index est ici considéré comme un *oscillateur*, possédant ses propres caractéristiques (comme la fréquence de mouvements). On parle alors d'un *système d'oscillateurs couplés*, puisque les deux oscillateurs interagissent. Ce couplage, dans le cas des coordinations intra-personnelles, est mécanique et d'origine neuromusculaire.

La *force du couplage* illustre l'intensité de cette interaction et rend compte de la force de la coordination. C'est cette force de couplage qui permet au système, composé des deux index, de produire des patrons de coordination stables. Si la force du couplage est très importante, alors la coordination est absolue. Si elle est faible, alors la coordination est relative. Lorsque les oscillateurs ne sont pas couplés, la coordination est absente. D'autres paramètres jouent également sur la coordination, comme la différence de fréquences des oscillateurs, ou la présence de bruit dans le système (Kelso, DelColle, & Schöner, 1990; Schöner et al., 1986). Ces deux paramètres ont ainsi été ajoutés au modèle HKB d'origine, permettant de rendre compte de l'ensemble des phénomènes observés dans la coordination intra-personnelle humaine. A l'heure actuelle, le modèle HKB est le plus utilisé pour rendre compte des coordinations motrices en général.

- *Cas particulier de la coordination intra-personnelle posturale*

Plus récemment, les études portant sur la coordination intra-personnelle se sont intéressées à l'organisation du corps dans son ensemble à travers la *coordination posturale*. Contrairement à une approche plus prescriptive (cf. Nashner & Mccollum, 1985), Bardy et collaborateurs considèrent que les états posturaux et leurs changements ne résultent pas de mécanismes neuromusculaires mais d'un processus d'auto-organisation, à l'image de la coordination bi-manuelle. La posture assure, en effet, le maintien de l'équilibre et la production des actions et comportements de chacun, tout en étant réciproquement influencées par ces actions (Bardy, 2004; Stoffregen & Riccio, 1988). Des contraintes (environnementales et individuelles) contribuent ainsi à modifier la coordination posturale. Afin de démontrer cela, ces auteurs ont mis en place une tâche de poursuite de cible auditive ou visuelle (Bardy, Marin, Stoffregen, & Bootsma, 1999; Bardy, Oullier, Bootsma, & Stoffregen, 2002; Coste, Gueugnon, Salesse, Bardy, & Marin, 2015; Marin, Bardy, Baumberger, Fluckiger, & Stoffregen, 1999; Stoffregen, Villard, Kim, Ito, & Bardy, 2009). Dans ces études, les participants, en station debout, devaient maintenir une distance constante entre la cible virtuelle oscillante et leur tête, créant ainsi des oscillations posturales dans la direction antéro-postérieure (Figure 4. A.). La coordination intra-personnelle posturale est ici investiguée par la phase relative entre l'articulation des hanches et l'articulation des chevilles (i.e., ϕ_{h-c} ; Figure 4. B.). Au même titre que la coordination bi-manuelle, les chercheurs ont observé l'émergence

spontanée de deux patrons stables de coordination posturale : le patron en phase ($\phi_{h-c} \approx 0-20^\circ$) et le patron en antiphase ($\phi_{h-c} \approx 160-180^\circ$), correspondant à une flexion/extension simultanée des deux articulations dans la même direction ou dans la direction opposée. Néanmoins, deux différences subsistent avec la coordination bi-manuelle. Premièrement, le patron en phase apparaît pour de petites amplitudes

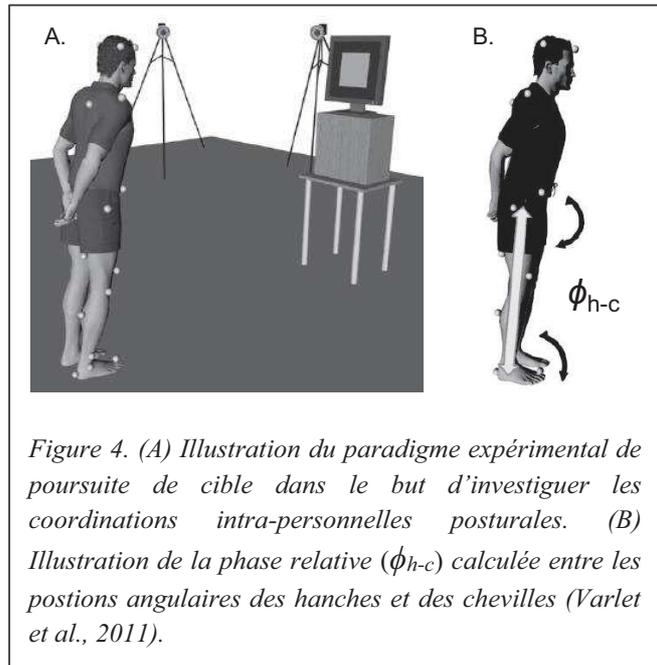


Figure 4. (A) Illustration du paradigme expérimental de poursuite de cible dans le but d'investiguer les coordinations intra-personnelles posturales. (B) Illustration de la phase relative (ϕ_{h-c}) calculée entre les positions angulaires des hanches et des chevilles (Varlet et al., 2011).

et faibles fréquences d'oscillations, alors que le patron en antiphase apparaît, quant à lui, pour de grandes amplitudes et hautes fréquences de mouvements (Bardy et al., 1999; Ferry, Cahouet, & Martin, 2007; Varlet, Marin, Lagarde, & Bardy, 2011). Finalement, une transition du patron en antiphase vers le patron en phase lorsque la fréquence est diminuée est observée. L'inverse est aussi vrai : lorsque la fréquence est augmentée, une transition du patron en phase vers le patron en antiphase apparaît (Bardy et al., 2002; Oullier, Marin, Stoffregen, Bootsma, & Bardy, 2006). Ces résultats confirment ainsi le caractère auto-organisé de la coordination intra-personnelle posturale.

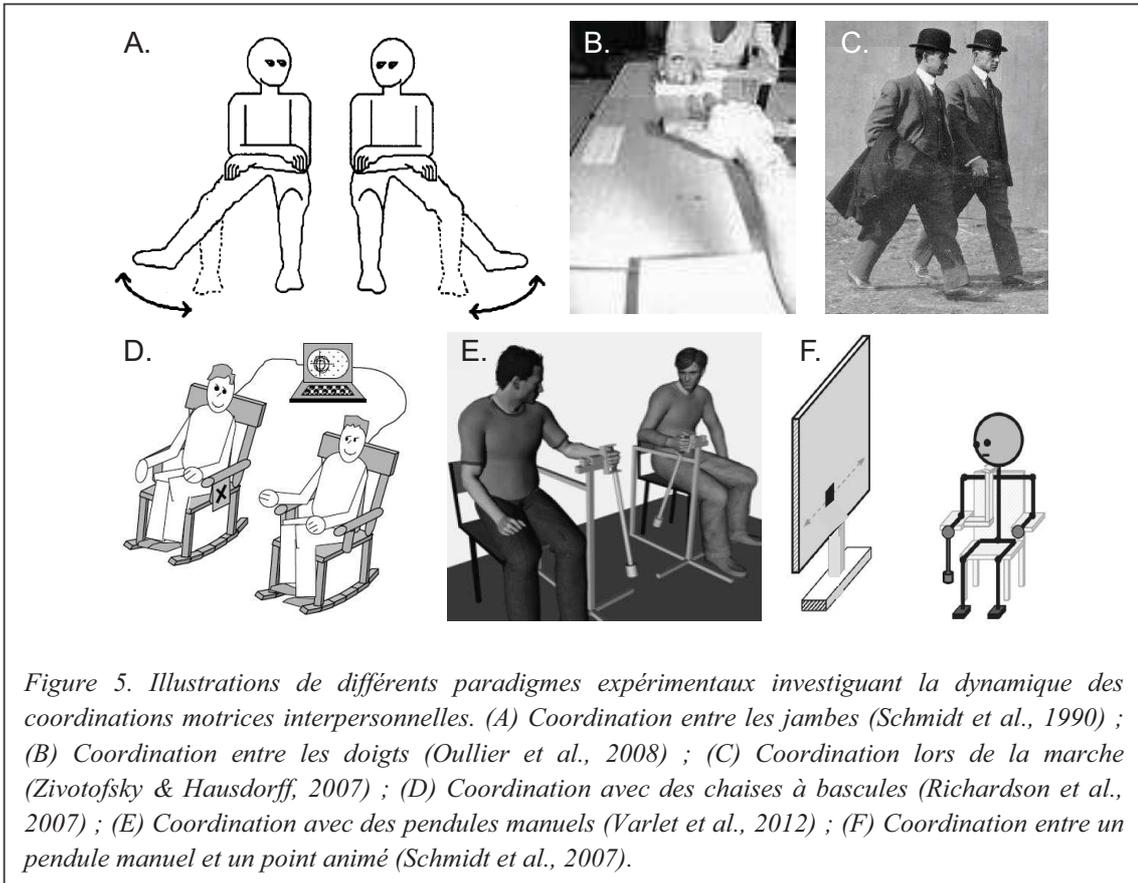
En conclusion, ces différentes expérimentations montrent que la coordination entre deux segments corporels d'un même individu émerge de la présence de contraintes environnantes. Un couplage neuromusculaire permet l'apparition de la coordination intra-personnelle. Deux patrons stables émergent : la phase et l'antiphase. La manipulation de contraintes environnantes entraîne une modification de la dynamique de coordination intra-personnelle. Cela reste vrai, même pour des coordinations plus complexes, telles que la coordination posturale. Voyons à présent si ces résultats sont observés entre les mouvements de deux individus, où le couplage n'est pas ici mécanique mais perceptif.

- *Coordination motrice interpersonnelle*

La première étude investiguant la coordination interpersonnelle provient de Schmidt, Carello, & Turvey (1990). L'objectif de cette étude était de démontrer qu'un couplage visuel entre deux personnes engendrait une coordination entre les mouvements des deux protagonistes, attestant de propriétés dynamiques similaires à celles de la coordination intra-personnelle. Dans cette étude, les participants étaient assis l'un à côté de l'autre et devaient produire des flexions/extensions continues d'une seule jambe (leur jambe extérieure; Figure 5. A.) en suivant le tempo d'un métronome. Les sujets devaient coordonner leurs mouvements de jambes soit en phase (c'est-à-dire une flexion/extension simultanée), soit en antiphase (un participant réalisait une flexion pendant que l'autre effectuait une extension) tout en maintenant le rythme du métronome. Durant chaque essai, la fréquence du métronome augmentait par palier de 0.2 Hz toutes les 5 secondes, allant de 0.6Hz à 2Hz permettant de manipuler indirectement la coordination. Leurs résultats ont mis en évidence deux patrons de coordinations stables entre les mouvements des deux sujets, ainsi qu'une plus grande stabilité du patron en phase étant donné la transition automatique et unilatérale du patron en antiphase vers le patron en phase lorsque la fréquence du métronome (et donc du mouvement) dépasse une valeur critique. Cette étude confirme ainsi que la coordination interpersonnelle repose sur des principes dynamiques semblables à ceux décrits par le modèle HKB pour la coordination intra-personnelle.

Plusieurs études ont par la suite confirmé ces résultats, en investiguant la coordination entre différents segments corporels de deux individus comme les doigts (Oullier, de Guzman, Jantzen, Lagarde, & Kelso, 2008 ; Figure 5. B.) ou la marche (van Ulzen, Lamoth, Daffertshofer, Semin, & Beek, 2008; Zivotofsky & Hausdorff, 2007 ; Figure 5. C.). D'autres ont également introduit un médiateur afin de pouvoir mesurer la robustesse de l'émergence de cette coordination interpersonnelle. C'est par exemple le cas des chaises à bascules (Richardson, Marsh, Isenhower, Goodman, & Schmidt, 2007 ; Figure 5. D.), ou des pendules manuels (Amazeen, Schmidt, & Turvey, 1995; Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick, & Amazeen, 1998; Schmidt & Turvey, 1994; Varlet et al., 2012 ; Figure 5. E.), ou même d'une interface graphique avec l'utilisation d'un point animé pour représenter un mouvement (de Ruyg, Salesse, Oullier, & Temprado, 2006; Schmidt, Richardson, Arsenault, & Galantucci, 2007; Zhao, Salesse, Gueugnon, Schmidt, Marin, & Bardy, 2015 ; Figure 5. F.). Enfin, dans le cadre des coordinations

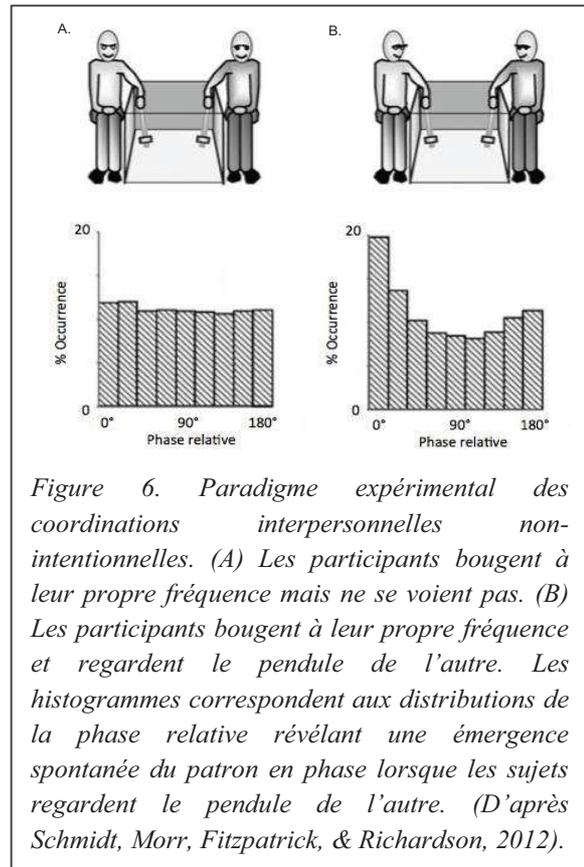
posturales, plusieurs études ont montré qu'une coordination s'opérait également entre les oscillations posturales de chaque individu (Shockley, Santana, & Fowler, 2003; Varlet et al., 2011).



- *Coordination interpersonnelle intentionnelle et non-intentionnelle*

La coordination interpersonnelle a souvent été investiguée au travers de tâches où il était explicitement demandé aux participants de se coordonner, mais également lorsqu'aucune consigne relative à la coordination n'était donnée aux sujets. Dans un cas, on parle de *coordination intentionnelle* et dans l'autre de la *coordination non-intentionnelle* (ou *spontanée*). Les paradigmes expérimentaux, précédemment détaillés, ont aussi bien été utilisés pour une tâche de coordination intentionnelle que non-intentionnelle. Par exemple dans le cadre des coordinations non-intentionnelles, Schmidt & O'Brien (1997) ont demandé à deux sujets d'osciller un pendule manuel à leur fréquence préférentielle sans regarder l'autre individu (Figure 6. A.), puis en regardant le pendule de l'autre sujet (Figure 6. B.). Leurs résultats indiquent un

rapprochement des fréquences individuelles et une occurrence de patrons de coordination stables en phase et en antiphase lorsque les participants peuvent se voir. Ainsi, cette étude pionnière sur les coordinations non-intentionnelles confirme les propriétés dynamiques de la coordination interpersonnelle même de manière spontanée. Ces résultats ont par la suite été confirmés (Neda, Ravasz, Brechet, Vicsek, & Barabasi, 2000; Richardson, et al., 2007; Richardson, Marsh, & Schmidt, 2005). Richardson et collaborateurs (2007) ont montré que la coordination non-intentionnelle était



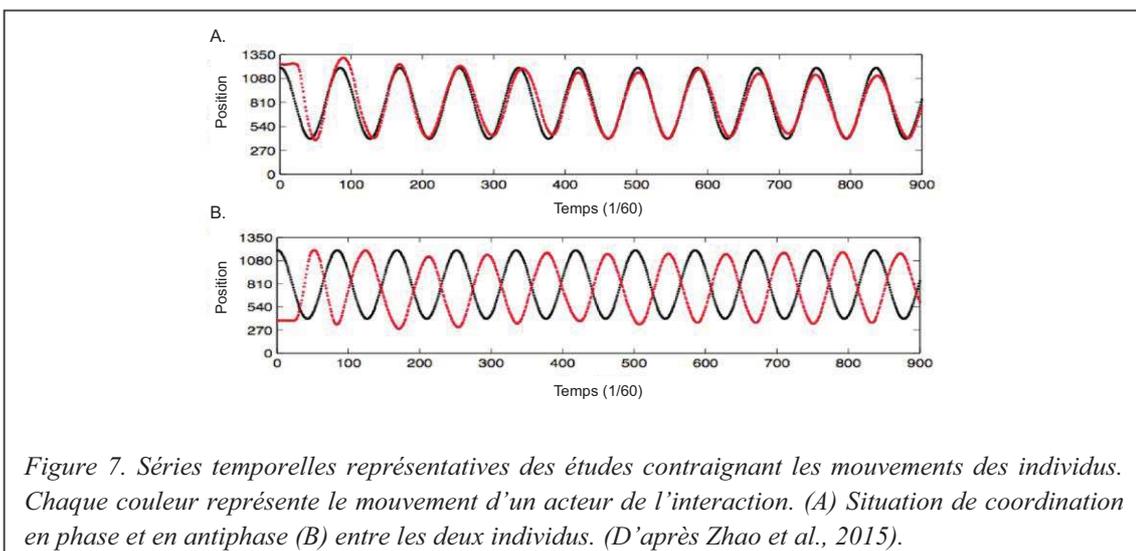
moins stable et présente que la coordination intentionnelle. En effet, dans le cas de la coordination intentionnelle, le but de la tâche est expliqué aux sujets. La coordination est ainsi fortement contrainte par l'objectif de la tâche, les deux étant confondus. Le couplage entre les deux personnes, perceptif ici, est alors plus fort induisant une coordination plus importante et plus stable (i.e., coordination absolue). Les participants arrivent ainsi à produire des mouvements en phase et en antiphase, et à maintenir ces états stables (jusqu'à un certain point). A l'inverse, la coordination non-intentionnelle n'est, elle, pas fortement contrainte par la tâche puisqu'elle ne correspond pas au but de celle-ci. En effet, aucune consigne relative à la coordination n'est donnée aux sujets. La coordination non-intentionnelle est seulement une propriété implicite qui émerge de la situation (Schmidt & O'Brien, 1997). Le couplage entre les deux personnes est alors plus faible, induisant une coordination intermittente (i.e., coordination relative). Les participants ne maintiennent généralement pas un état stable de coordination, illustré par une occurrence de patron en phase de l'ordre de 20% seulement dans l'étude de Schmidt & O'Brien (1997 ; Figure 6. B.).

Finalement, les tâches intentionnelles et non-intentionnelles ont souvent été utilisées afin de rendre compte des interactions sociales, dans lesquelles des

phénomènes de coordinations interpersonnelles surviennent entre les protagonistes de l'interaction (Schmidt & Richardson, 2008). Dans certains cas, la coordination entre les individus est intentionnelle dans le but d'augmenter nos capacités d'actions ou dans l'atteinte d'un but commun, comme par exemple déplacer un meuble lourd (Marsh, Richardson, & Schmidt, 2009; Richardson, Marsh, & Baron, 2007). Dans d'autres situations, la coordination se produit aussi spontanément lors d'une interaction sociale, comme durant une discussion (Schmidt, Nie, Franco, & Richardson, 2014). Néanmoins, certaines limites peuvent être observées au regard de ces paradigmes expérimentaux.

2. 2. 4. Limites et contraintes de ces paradigmes expérimentaux

Ces paradigmes expérimentaux ont été conçus afin de démontrer les propriétés dynamiques de la coordination motrice. En effet, comme nous l'avons précédemment expliqué, chaque composant du système est considéré comme un oscillateur. Ces oscillateurs produisent des mouvements pendulaires sans variations de fréquences ou d'amplitude. Les mouvements testés dans ces paradigmes expérimentaux correspondent ainsi à des mouvements d'oscillations à fréquence et amplitude fixes. Dans ces différentes études, il était, en effet, demandé aux participants de réaliser des mouvements d'oscillations régulières à une allure la plus confortable possible (Figure 7.). Les mouvements produits ne sont ainsi composés que d'une seule fréquence (préférentielle ou imposée par un stimulus) et d'une amplitude fixe. L'initiation du mouvement (« *onset* »), c'est à dire son point de départ, reste également le même tout au long d'un essai.



L'utilisation de ces paradigmes présente ainsi des limites dans l'étude des comportements moteurs d'interaction, dès lors que la variété des actions réalisées dépasse le cadre de mouvements pendulaires. En effet, ils ne prennent pas en compte la créativité des mouvements, pourtant fondamentale dans les interactions sociales. Les mouvements obtenus ne correspondent pas aux mouvements couramment produits et observés dans les interactions sociales quotidiennes (exceptés pour la marche). Les mouvements produits par les protagonistes d'une interaction ne sont ni contraints en terme de fréquence, d'amplitude ou de point de départ. Au contraire, les individus produisent des mouvements plus complexes et maintiennent une organisation spatio-temporelle de leurs propres mouvements et avec les mouvements d'autrui. Dès lors que ces contraintes apposées aux mouvements à produire sont levées, la créativité des mouvements, et plus généralement l'improvisation, est alors à considérer dans les tâches expérimentales à proposer. En ce sens, il semble intéressant, à présent, de s'affranchir de ces contraintes de mouvements afin de se rapprocher au mieux de situations de la vie quotidienne, où la créativité motrice et la coordination interpersonnelle sont observées.

Résumé

La coordination est définie comme l'organisation spatio-temporelle d'éléments. L'approche dynamique des coordinations explique l'apparition de la coordination par le processus d'auto-organisation. Elle émerge de l'interaction entre plusieurs sous-systèmes et dépend de contraintes propres à l'individu, de contraintes présentes dans l'environnement et au sein du contexte de la situation.

Un couplage mécanique et perceptif, respectivement observé dans la coordination bi-manuelle (ou posturale) et interpersonnelle, est suffisant pour entraîner la coordination entre deux mouvements. Les résultats observés permettent, en partie, d'expliquer la survenue de la coordination dans les interactions sociales.

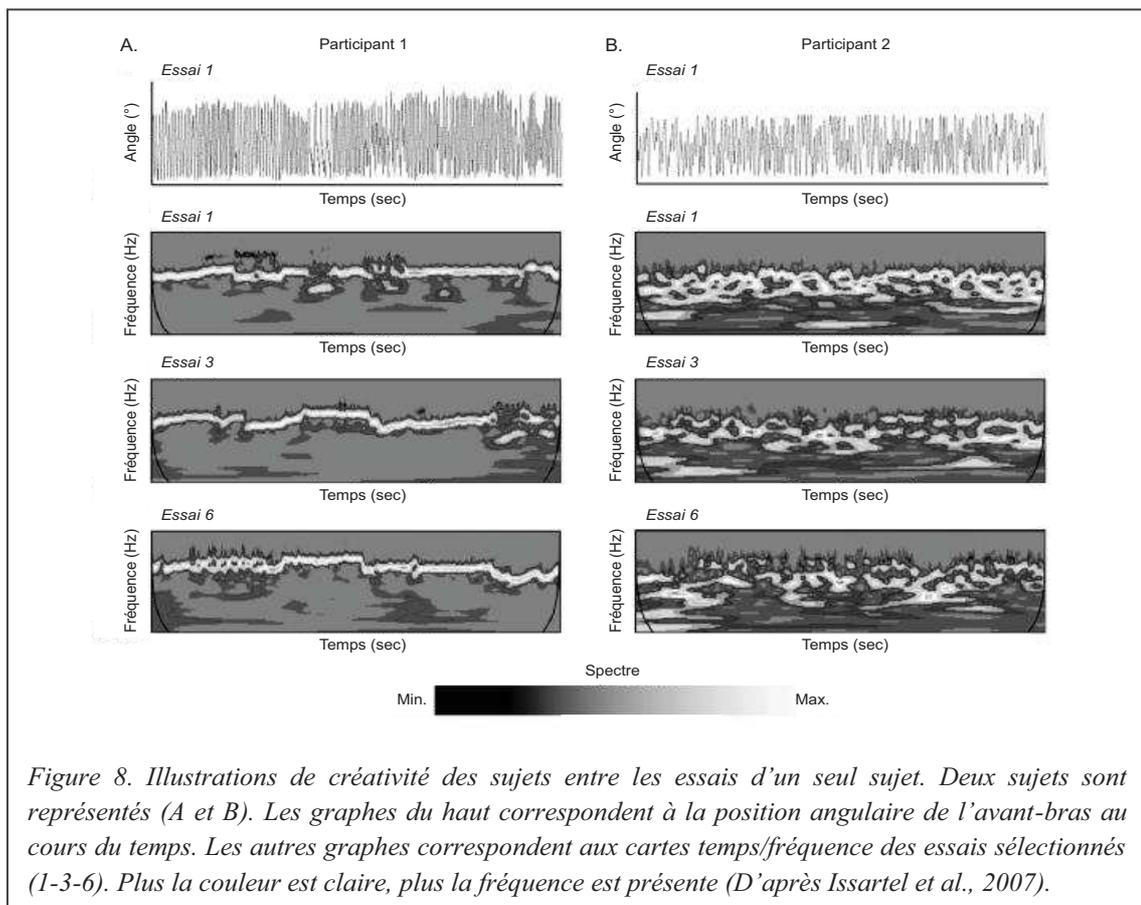
Néanmoins, les paradigmes mis en place pour rendre compte de l'émergence de la coordination ne permettent pas témoigner de la complexité des comportements observés durant les interactions sociales.

Bien que peu investiguée, l'étude de situations où les mouvements impliqués sont plus riches et où la coordination interpersonnelle entre en jeu, semble toutefois indispensable afin de se rapprocher d'un véritable contexte d'interactions sociales. L'utilisation de l'improvisation socio-motrice semble être un bon candidat.

2. 3. Situations d'improvisation socio-motrice

2. 3. 1. Les prémices

Une des premières études à s'intéresser à des mouvements plus complexes a été réalisée par Issartel, Marin, & Cadopi (2007). Ils ont ainsi demandé à leurs participants de « bouger leur avant-bras dans le plan sagittal, en explorant, sans contraintes, l'ensemble de fréquences, d'amplitudes et de phases possibles ». Bien que les auteurs ne parlent pas explicitement d'improvisation ni de créativité, les mouvements produits dépendent de la capacité des sujets à improviser, à créer des mouvements. Les réponses comportementales observées peuvent alors être perçues comme la créativité motrice. Comme on peut le voir sur la Figure 8, les sujets produisent des mouvements d'amplitudes et de fréquences différentes. L'utilisation de carte temps/fréquence (appelée scalogramme⁴) permet de mettre en exergue la créativité des sujets (Figure 8. de la 2^{ème} à la 4^{ème} ligne).



⁴ La méthode utilisée dans cette étude est détaillée dans le Chapitre 2 du manuscrit.

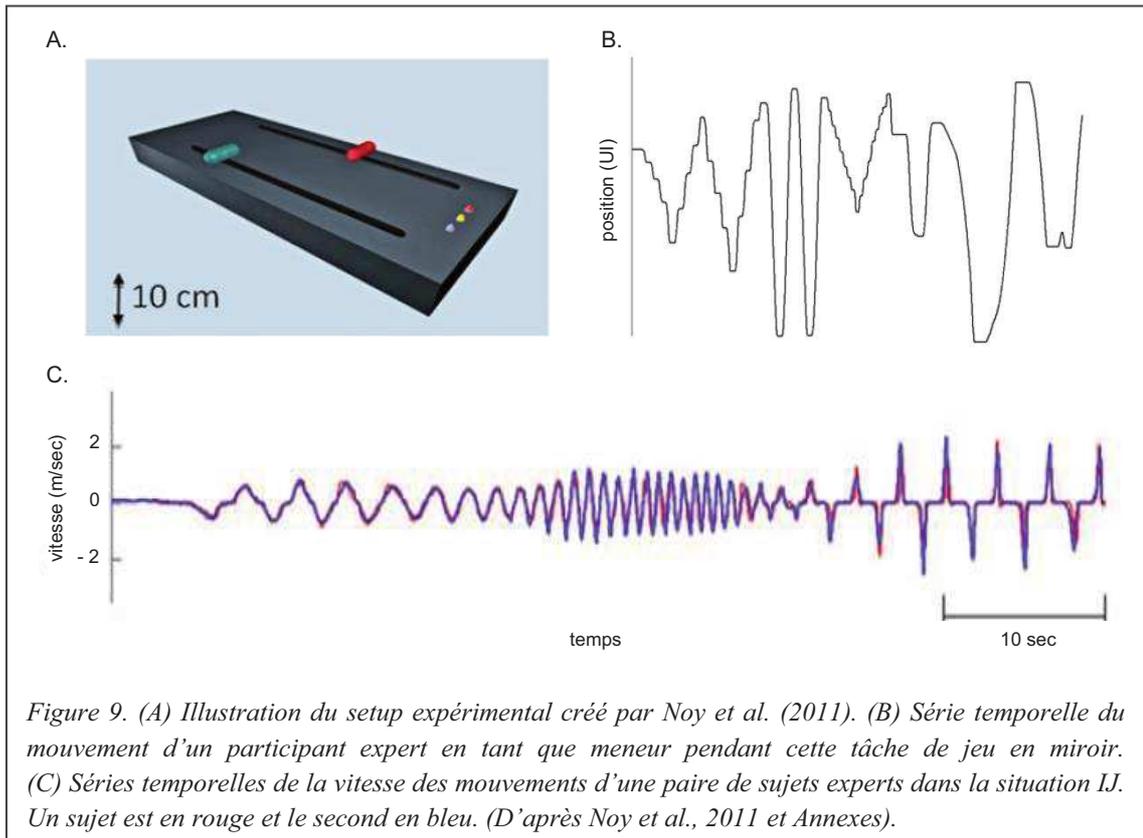
L'abscisse correspond au temps (en secondes) et l'ordonnée indique les fréquences. Les fréquences présentes dans le signal sont illustrées par la couleur blanche sur les graphiques. Plus la couleur blanche est présente sur cette carte et plus le spectre de fréquences, c'est-à-dire les fréquences produites dans le mouvement, est important. Il est ainsi possible d'observer que les deux sujets possèdent des réponses comportementales différentes reflétant une créativité différente. Le participant 1 (Figure 8. A.) a majoritairement réalisé des mouvements de mêmes fréquences alors que le participant 2 (Figure 8. B.) a produit des mouvements contenant plus de fréquences différentes. Une certaine reproductibilité est d'ailleurs retrouvée entre les essais d'un même sujet, suggérant la présence d'une signature motrice propre à chaque individu (Issartel et al., 2007). Cette réponse comportementale, illustrant la créativité, semble également être modifiée par l'interaction. En effet, deux conditions d'interaction ont été testées : (i) une condition *Off* où il était explicitement demandé aux paires de participants de ne pas se coordonner ; (ii) et une condition *On* où les sujets devaient cette fois-ci se coordonner intentionnellement. Une coordination entre les mouvements des sujets est apparue dans la condition *On*. Plus précisément, la coordination en phase a émergé spontanément, suggérant que la coordination interpersonnelle apparaît entre des mouvements plus complexes. Dans la condition *Off*, une corrélation entre les fréquences des mouvements des individus a été observée suggérant la survenue d'une plus faible synchronisation interpersonnelle, bien qu'il leur était explicitement demandé de ne pas coordonner. Ainsi, la coordination entre des mouvements plus complexes et improvisés est également observable au cours d'une situation intentionnelle comme spontanée. D'autres études ont confirmé la coordination entre des mouvements plus complexes (Schmidt et al., 2012; Schmidt et al., 2014; Tschacher, Rees, & Ramseyer, 2014). Dans ces études, les auteurs n'ont pas mesuré ni contrôlé la richesse des mouvements produits, mais ils ont évalué la coordination s'opérant entre les mouvements corporels de deux individus discutant. Les sujets, debout l'un en face de l'autre, coordonnaient spontanément leurs mouvements (Schmidt et al., 2014). De plus, la personne menant la discussion influençait plus l'autre personne qu'inversement, suggérant l'effet d'un rôle dans l'interaction sur la coordination. Finalement, ces études nous suggèrent que des sujets naïfs sont capables de créer et produire des mouvements riches et complexes, mais également de se coordonner dans une situation expérimentale comme dans une situation « écologique » (i.e., proche de la vie réelle). Ainsi, la

créativité et la coordination semblent reposer sur des capacités propres à chaque individu. En ce sens, d'autres études ont exploré si les experts en danse, et plus généralement en art, possédant un fort vécu dans la créativité et l'improvisation, présentent ainsi de plus fortes capacités d'improvisation.

2. 3. 2. Effet de l'expertise en art

En utilisant un paradigme proche de celui usité dans leur étude de 2007, Issartel, Marin, & Cadopi (2006a) ont comparé un groupe d'experts en danse (donc en improvisation) à un groupe de non-danseurs. Leurs résultats illustrent que les danseurs produisent des mouvements plus riches et complexes, et sont plus coordonnés que les non-danseurs. Plus récemment, Noy et collaborateurs ont introduit un nouveau paradigme dans le but d'investiguer quantitativement l'improvisation socio-motrice chez des sujets experts en improvisation et des sujets novices (Hart, Noy, Feniger-Schaal, Mayo, & Alon, 2014; Noy, Dekel, & Alon, 2011; Noy, Levit-Binun, & Golland, 2015). Ils ont ainsi adapté un jeu couramment utilisé dans les activités d'art, à savoir le *jeu en miroir* (Spolin, 1999). Dans leur étude de 2011, deux participants étaient assis l'un en face de l'autre et tenaient un curseur dans les mains (Figure 9. A.). Ils devaient déplacer ce curseur le long d'un axe frontal dans le but de « créer des mouvements complexes, variés et intéressants tout en étant coordonnés » (Figure 9. B.). Le but est ainsi d'improviser et d'être créatif tout en étant coordonné : il s'agit d'une collaboration. Deux conditions d'interactions ont été utilisées afin de manipuler les rôles des individus dans l'interaction sociale : *Meneur-Suiveur* et *Improvisation Jointe* (MS et IJ respectivement). Dans la condition MS, un sujet est au préalable désigné comme étant le meneur pour improviser, alors que le second participant, le suiveur, reproduit les mouvements du meneur. Dans la situation IJ, aucun des deux sujets n'est pré-désigné comme étant meneur ou suiveur, l'improvisation émerge spontanément. Les sujets passent ainsi, dans le même essai, d'un rôle où ils mènent l'interaction, à un rôle où ils suivent cette interaction (Figure 9. C.). Les paires de sujets étaient soit constituées de deux experts en activité d'art (et donc en improvisation) ou de deux novices. La performance d'improvisation est mesurée au travers des deux paramètres précédemment détaillés: la créativité motrice et la synchronisation entre les mouvements⁵.

⁵ Les différentes méthodes utilisées sont détaillées dans le Chapitre 2 du manuscrit.



Leurs résultats indiquent que les experts et les novices n'ont pas les mêmes comportements et les mêmes performances dans le jeu en miroir. En effet, les experts réalisent des mouvements plus complexes et plus riches que les novices, tout en produisant une meilleure coordination entre les mouvements. De manière intéressante, ces résultats montrent que la créativité motrice dépend du répertoire initial de l'individu, mais aussi de son expérience et de son vécu. Il semble donc possible de l'améliorer et de l'enrichir. À l'image de la créativité, la coordination dépend elle aussi du vécu et de l'expérience de l'individu, et peut ainsi être améliorée. Le comportement expert est également caractérisé par une meilleure performance dans la condition IJ que dans la condition MS. La condition IJ correspond majoritairement aux situations d'improvisation observées dans les activités d'arts, où il n'y a pas forcément de meneurs ni de suiveurs prédéfinis. Ainsi, leur expérience en activités d'art leur permettrait de mieux s'adapter à cet échange de rôle. À l'instar de l'improvisation entre deux acteurs ou musiciens, des moments de parfaite synchronisation ont également été retrouvés entre les mouvements des experts dans la condition IJ uniquement, reflétant ainsi une signature de l'expertise (Nachmanovtich, 1990; Noy et al., 2011; Seham, 2001). L'influence de l'expertise sur des performances socio-motrices a également été

montrée chez des experts en danse pour lesquels la coordination interpersonnelle était globalement meilleure que celle de novices (Sofianidis, Hatzitaki, Grouios, Johannsen, & Wing, 2012; Washburn et al., 2014).

Pour conclure, l'ensemble de ces résultats nous indique que la coordination entre des mouvements riches et complexes apparaît de manière plutôt robuste, puisque retrouvée dans des situations non-intentionnelles. Bien que peu d'études se soient encore intéressées à ce phénomène, plusieurs paradigmes, comme le jeu en miroir, semblent particulièrement adaptés pour investiguer les interactions sociales à travers l'improvisation. En effet, les situations d'improvisation permettent de mesurer conjointement la créativité et la coordination entre les protagonistes. Ces deux paramètres mettent en lumière les différences entre des novices et des experts en improvisation artistique : les experts possèdent de meilleures capacités d'improvisation illustrées par une meilleure coordination et une plus grande créativité motrice. L'amélioration des capacités d'improvisation paraît ainsi possible. Ces résultats comportementaux corroborent également l'existence de modifications des mécanismes neuronaux impliqués durant une improvisation musicale entre des experts en musiques et des novices (voir Beaty, 2015 pour une revue). La créativité et la coordination interpersonnelle, présentes dans la communication non-verbale, sont toutes deux fondamentales dans l'établissement et le succès des interactions sociales (Burgoon, et al., 1989 ; Schmidt & Richardson, 2008). Il a notamment été montré qu'un programme de danse créative améliore globalement les interactions sociales d'enfants (Lobo & Winsler, 2006). L'expertise en improvisation artistique favorise alors la communication non-verbale et donc les interactions sociales. A l'inverse, un déficit de communication non-verbale et d'interactions sociales devient dans certaines proportions un des symptômes principaux des maladies mentales (*Diagnostic and Statistical Manual – 5^{ème} édition* ; DSM-V). Plusieurs pathologies mentales sont caractérisées par un déficit de communication avec autrui et donc d'interaction sociale. C'est le cas par exemple des pathologies dites sociales. Nous pensons que l'étude de la pathologie mentale pourrait contribuer à la compréhension des phénomènes interpersonnels, et plus généralement des capacités d'improvisation. Ainsi, dans la prochaine partie, nous nous focaliserons sur ces pathologies, et plus précisément sur la schizophrénie et son effet sur les interactions sociales.

Résumé

Peu d'études ont conjointement investigué la créativité des mouvements et la coordination entre ces mouvements. Néanmoins, quelques expérimentations ont démontré une coordination possible entre des mouvements riches et complexes.

Le paradigme du *jeu en miroir* est particulièrement adapté pour la capture des capacités d'improvisation évaluées à l'aide de ces deux paramètres. Ces capacités semblent pouvoir être améliorées, à l'image d'une créativité motrice et d'une coordination plus importantes chez les experts en activités d'art.

A l'inverse, certaines pathologies dites sociales entraînent un déficit d'interaction sociale. L'investigation de ce déficit à travers une tâche d'improvisation pourrait permettre une meilleure compréhension des troubles comportementaux moteurs associés.

3. Pathologies sociales et improvisation

La schizophrénie, le trouble du spectre autistique et la phobie sociale sont considérés comme des pathologies sociales. Un point commun majeur à ces pathologies est la présence d'un déficit d'interaction sociale menant généralement à un isolement social (Möller, 2007; Mundy, Sigman, Ungerer, & Sherman, 1986; Wittchen, Fuetsch, Sonntag, Muller, & Liebowitz, 2000). Une communication non-verbale inadaptée explique, parmi d'autres candidats, ce trouble (Bateson, 1955). La schizophrénie conduit à une réduction des relations interpersonnelles plus importante que dans les autres pathologies (Goldberg, Rollins, & Lehman, 2003). Ainsi, dans cette section, nous nous attarderons sur cette pathologie, et les effets associés sur la créativité et la coordination motrice.

3.1. Définition et diagnostic

La schizophrénie est un trouble mental touchant environ 1,5 à 2,5% de la population mondiale adulte selon l'OMS. Elle touche aussi bien les hommes que les femmes (55 et 45% respectivement). Il s'agit d'une pathologie mentale sévère et chronique pouvant se déclarer dès l'adolescence (entre 12 et 30 ans en moyenne). L'apparition de la schizophrénie se fait généralement de manière progressive. Certains facteurs de risques d'origines génétique et environnementale ont été identifiés. En effet, l'implication de plusieurs gènes est en cause (Harrison & Owen, 2003). Le risque de déclarer cette maladie est de 50% lorsque les deux parents sont eux-mêmes atteints de schizophrénie (McGuffin, Owen, & Farmer, 1995). Chez des jumeaux, si l'un des deux souffre de schizophrénie, le risque pour l'autre jumeau de déclarer cette pathologie est de 60 à 84% (Cardno et al., 1999). Au niveau environnemental, plusieurs types de facteurs de risques sont avancés (voir M. Cannon & Clarke, 2005 pour revue). D'une part, certains facteurs de risques environnementaux sont liés à des complications obstétriques menant à une hypoxie du fœtus. Par exemple, des difficultés durant la grossesse (diabète gestationnel) ou pendant l'accouchement (prématurité et césarienne d'urgence) augmentent le risque d'apparition de la maladie (Cannon, Jones, & Murray, 2002; Cannon et al., 2000). D'autre part, des facteurs de risques sociodémographiques entrent également en jeu. L'un des plus important reste le lieu de vie. En effet, un taux plus élevé de personnes souffrant de schizophrénie est observé dans les zones urbaines

contrairement aux zones rurales (Kelly et al., 2010; Peen & Dekker, 1997). La pauvreté et le niveau de classe sociale sont également d'importants facteurs de risques : plus la personne vit dans un milieu à petit revenu et de faible niveau social, et plus le risque de déclarer la schizophrénie est important (Bruce, Takeuchi, & Leaf, 1991; Fox, 1990). Une partie de la population issue d'anciens migrants est plus sujette à déclarer la schizophrénie, du fait notamment, d'un fort rejet social (Weiser et al., 2008). Enfin, la consommation et la dépendance aux drogues comme le cannabis multiplie par deux le risque d'apparition de cette maladie (Henquet, Murray, Linszen, & van Os, 2005; Moore et al., 2007).

La schizophrénie est accompagnée de modifications de plusieurs structures cérébrales (Andreasen et al., 1994; Lawrie & Abukmeil, 1998; Wright et al., 2000). Des volumes plus petits de matière grise ou de certaines régions du cerveau sont observés chez ces personnes. C'est le cas par exemple du lobe frontal, engagé au niveau de l'attention et de la production motrice, ou encore de l'hippocampe et de l'amygdale impliqués dans le contrôle des émotions. Au niveau comportemental, ces anomalies se traduisent par un déficit d'attention, des troubles moteurs et psychologiques pouvant se déclarer avant la survenue de la pathologie (Cannon et al., 2000). La symptomatologie de la schizophrénie se regroupe autour de deux grands types de symptômes : les symptômes positifs et les symptômes négatifs (Crow, 1980). Les symptômes positifs (hallucinations et délires) sont anormaux par leur présence alors que les symptômes négatifs (troubles attentionnels, moteurs ou langagiers) restent anormaux par leur absence. Bien que non visibles, les symptômes négatifs induisent un réel handicap dans les activités quotidiennes de ces personnes, à l'exemple d'un déficit d'interaction sociale (e.g., Makinen, Miettunen, Isohanni, & Koponen, 2008). La schizophrénie se caractérise ainsi par des distorsions de l'esprit (émotion, perception, pensée) et du comportement (langage, mouvements), mais aussi par des modifications du contexte de vie. L'ensemble de ces symptômes conduit notamment à un déficit d'interaction sociale, caractéristique de la schizophrénie (Möller, 2007).

Le trouble d'interaction sociale a notamment été illustré par des difficultés d'intégration sociale. D'après Thornicroft et collaborateurs (2004), 65% des personnes souffrant de schizophrénie vivent seules et seulement 17% d'entre elles sont mariées. De plus, le nombre de relations amicales moyen chez ces personnes là serait 7 fois moins important que chez des individus sains (Giacco et al., 2012). Un important effet

de discrimination des personnes saines envers les individus souffrant de schizophrénie est tout de même à prendre en compte dans cette absence d'interaction sociale. Cependant, ce déficit d'interaction sociale est en grande partie expliqué par une altération des capacités de la théorie de l'esprit⁶ (*ToM*) mais également par la présence de troubles moteurs (Rogers, 1992; Sprong, Schothorst, Vos, Hox, & van Engeland, 2007). Dans la prochaine section, nous détaillerons ces troubles moteurs, et plus précisément, l'effet de la schizophrénie sur les deux paramètres de l'improvisation socio-motrice : la créativité et la coordination interpersonnelle.

3. 2. Schizophrénie et créativité

Comme indiqué précédemment, deux types de créativité peuvent être distingués : la créativité artistique (élitiste) et la créativité ordinaire (quotidienne). La créativité artistique a souvent été liée à la présence de traits d'anxiété, symptôme observé chez les personnes souffrant de pathologies mentales telles que la schizophrénie (Andreasen, 1987; Silvia & Kaufman, 2010). Notons bien que tous les génies créatifs ne souffrent bien évidemment pas de schizophrénie, mais ils présenteraient une vulnérabilité plus importante pour cette pathologie. Il existerait un continuum entre la créativité (présent chez des sujets sains) et la schizophrénie (pathologique). La présence de gènes communs chez des individus à forte créativité et chez des personnes souffrant de schizophrénie peut également expliquer cette relation (Keller & Visscher, 2015; Kéri, 2009). Des études menées sur les membres sains des familles de personnes souffrant de schizophrénie ont d'ailleurs montré qu'ils disposaient d'une plus importante créativité contrairement aux membres des familles sans aucun cas de schizophrénie recensé (Kyaga et al., 2011). En ce sens, Brod (1997) a montré que les personnes souffrant de schizophrénie faisaient preuve d'une plus grande créativité lorsque les symptômes de cette pathologie étaient moins sévères, suggérant ici que la schizophrénie en elle-même n'entraîne pas forcément plus de créativité (artistique).

Alors que l'effet de la schizophrénie sur la créativité artistique est controversé, l'impact de cette pathologie sur la créativité ordinaire et quotidienne semble plus net. En effet, les réponses comportementales des patients souffrant de schizophrénie sont altérées au quotidien. Dans le cadre des interactions sociales, la créativité est observée

⁶ La théorie de l'esprit (ou « *Theory of Mind* ») correspond aux aptitudes des personnes à prévoir ou à reconnaître le comportement et l'état mental d'autrui.

au travers de la richesse du répertoire de mouvements, impliquée notamment dans la communication non-verbale. Le déficit de communication non-verbale connu dans cette pathologie se traduit au niveau des expressions faciales et également au niveau de la gestuelle co-verbale. Trémeau et collègues (2005) ont par exemple noté que les patients produisent spontanément moins d'expressions faciales, de sourires et de gestes co-verbales que les sujets sains. De surcroît, d'autres études ont montré des dysfonctionnements moteurs des personnes souffrant de schizophrénie lorsqu'ils interagissent avec autrui (Condon & Ogston, 1966; Del-Monte et al., 2013; Kupper, Ramseyer, Hoffmann, Kalbermatten, & Tschacher, 2010; Lavelle, Healey, & McCabe, 2013; Troisi, Spalletta, & Pasini, 1998). Dans cette dernière étude, Troisi et collaborateurs (1998) ont analysé et coté le comportement non-verbal des patients et sujets sains durant une interaction. Leurs résultats indiquent une restriction globale du comportement non-verbal suggérant une richesse du répertoire de mouvements moindre chez les patients que chez les sujets sains. De manière plus poussée, Kupper et collègues (2010) ont, quant à eux, confirmé ces résultats et montré que les comportements moteurs (hochements de tête ou gestes de mains), comme la vitesse et le pourcentage de temps de mouvements, sont réduits chez les personnes souffrant de schizophrénie. Cette plus faible richesse de mouvements présente dans la schizophrénie est corrélée aux plus faibles capacités des patients à prévoir et reconnaître le comportement et l'état mental d'autrui (ToM): plus le répertoire de mouvements est réduit, plus les personnes ont de faibles performances en ToM (Kupper et al., 2010). D'autres études ont montré que le comportement moteur des personnes souffrant de schizophrénie, en plus d'être réduit, est également moins varié. En effet, lors d'une tâche de « Pierre-Feuille-Ciseaux », les patients présentent des réponses motrices moins randomisées et plus stéréotypées que les individus sains. Lorsqu'ils effectuent cette tâche à deux, les patients ont tendance à reproduire le geste réalisé à l'essai précédent par l'autre participant, suggérant ainsi une plus faible créativité motrice induite par la schizophrénie (Baek et al., 2013). Ces résultats corroborent d'autres résultats témoignant d'une moindre variabilité dans une tâche de génération aléatoire de « tap » d'un doigt (Hornero, Alonso, Jimeno, Jimeno, & Lopez, 1999), ou dans une tâche de génération aléatoire de nombres (Chan et al., 2011; Horne, Evans, & Orne, 1982; Shinba, Shinozaki, Kariya, & Ebata, 2000).

Ainsi, l'ensemble de ces résultats indique que la schizophrénie entraîne plutôt un déficit de variété, de richesse et de production de mouvements durant les interactions sociales. Voyons à présent si ce potentiel déficit au niveau de la créativité est également observable au niveau de la coordination motrice.

3. 3. Schizophrénie et coordination

Tout d'abord, la schizophrénie induit des troubles de coordination intra-personnelle (Neelam, Garg, & Marshall, 2011). Les personnes souffrant de schizophrénie sont, par exemple, capables de produire une coordination bi-manuelle en phase, et ce quelque soit la fréquence de mouvements. Par contre, les patients sont incapables de maintenir le patron en antiphase et transitent vers le patron en phase à une plus haute fréquence que les sujets sains (Bellgrove et al., 2001). La présence de troubles attentionnels pourrait expliquer ces résultats. La coordination interpersonnelle est également impactée par la schizophrénie. Les patients ont, par exemple, des difficultés à synchroniser leurs mouvements de l'index avec un métronome extérieur ou lors de poursuite de cible avec la main (Carroll, O'Donnell, Shekhar, & Hetrick, 2009; Silver, Shlomo, Schwartz, & Hocherman, 2002). Plus récemment, la dynamique des coordinations motrices interpersonnelles des patients a été investiguée (Lazerges et al., 2011; Varlet et al., 2012). Dans cette dernière étude, Varlet et collaborateurs ont évalué la coordination interpersonnelle intentionnelle et non-intentionnelle entre une personne souffrant de schizophrénie et un sujet sain, ou entre deux individus sains. Les participants de chaque paire devaient produire des oscillations à l'aide d'un pendule manuel. Leurs résultats suggèrent que la coordination non-intentionnelle est préservée chez les personnes atteintes de schizophrénie. A l'inverse, la coordination intentionnelle est altérée avec une plus grande variabilité de coordination et des difficultés à mener l'interaction. La présence de troubles perceptivo-moteurs, tels qu'un déficit attentionnel, pourrait diminuer la force de couplage, altérant ainsi la coordination. Bien que cette étude ne montre qu'une altération de la coordination interpersonnelle intentionnelle, elle indique néanmoins une altération de la coordination interpersonnelle en présence de la schizophrénie. L'absence de résultats sur la coordination spontanée est quelque peu surprenante, mais peut se justifier par l'hétérogénéité des symptômes de cette maladie. En effet, des patients ayant de forts symptômes négatifs ont d'avantage de troubles de coordination spontanée lors d'une discussion (Kupper, Ramseyer, Hoffmann, &

Tschacher, 2015). Finalement, à l'instar de ces derniers résultats, la tendance à l'imitation des comportements observés, fondamentale dans le succès des interactions sociales, est également altérée avec la schizophrénie (Park, Matthews, & Gibson, 2008). Cette dernière étude a montré que les patients éprouvent plus de difficulté à imiter les expressions faciales observées. Ce déficit d'imitation est significativement corrélé avec les troubles d'interactions sociales présent dans la schizophrénie (Park et al., 2008).

Pour conclure, la schizophrénie induit d'importants troubles au niveau de la communication non-verbale. Ce trouble explique, en partie, le déficit d'interaction sociale reconnue pour cette pathologie. Plus spécifiquement, la créativité et la coordination semblent altérées chez ces patients, suggérant de moindres capacités d'improvisation socio-motrice. En effet, à l'instar de la créativité motrice, les précédentes études suggèrent que la coordination motrice est altérée par la présence de la schizophrénie aussi bien au niveau intra-personnel que interpersonnel. Néanmoins, ces résultats ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble des altérations de leur comportement en situation d'improvisation socio-motrice.

Résumé

La schizophrénie est une pathologie dite sociale, altérant notamment la communication non-verbale. Un déficit d'interaction sociale est ainsi majoritairement observé.

Ce trouble de la communication non-verbale est observé par un déficit au niveau de la production, de la variété et de la richesse des mouvements produits durant l'interaction (i.e., créativité) ; mais aussi par un déficit au niveau de la coordination motrice intra-personnelle et interpersonnelle.

L'investigation conjointe de la créativité et de la coordination dans des situations d'improvisation socio-motrice semble particulièrement pertinente pour comprendre le déficit d'interaction sociale présent dans la pathologie schizophrénique.

4. Questionnements et Hypothèses

Cette revue de littérature a permis de montrer que l'improvisation, et plus particulièrement l'improvisation socio-motrice semble être un bon moyen d'investigation des interactions sociales. Plus précisément, nous nous intéressons ici au comportement moteur dans sa globalité, fondamental dans ces interactions. Comprendre les comportements moteurs produits durant les interactions sociales repose sur la compréhension des individus à improviser – « *Life is a continual improvisation* » (Agre & Chapman, 1987 ; p. 268). Ces capacités d'improvisation reflètent la faculté des individus à interagir avec autrui en adaptant leurs réponses comportementales à la situation et à l'environnement. L'improvisation impose la présence d'un cadre, d'un but précis mais émerge de l'interaction entre les protagonistes et ce, sans script prédéfini à l'avance. C'est le cas également des interactions sociales. La production, la variété et la richesse des mouvements produits (i.e., créativité), tout comme l'organisation spatio-temporelle entre ces mouvements (i.e., coordination), sont deux paramètres primordiaux, aussi bien dans les situations d'improvisation que dans les interactions sociales (Burgoon et al., 1989 ; Schmidt & Richardson, 2008). L'approche dynamique des coordinations nous donne un cadre théorique et d'interprétation dans lequel les notions d'auto-organisation et de contraintes présentes dans l'environnement sont mises en avant pour expliquer la survenue de la coordination. Néanmoins, au sein de cette approche dynamique, la majorité des paradigmes expérimentaux utilisés ne permet pas de comprendre le phénomène d'improvisation dans son ensemble, se restreignant majoritairement à des tâches de production de mouvements contraints. L'étude conjointe de la créativité et de la coordination est pourtant fondamentale pour rendre compte de l'ensemble des comportements moteurs lors d'une interaction sociale. Afin de mesurer la coordination et la créativité conjointement, le jeu en miroir, dans lequel les individus doivent intentionnellement créer et coordonner leurs mouvements, semble particulièrement adapté afin d'observer ces deux paramètres et leurs évolutions. L'objectif de cette thèse est ainsi de mieux comprendre les comportements moteurs en situations d'improvisation, dans un désir d'appréhender plus profondément les comportements moteurs observés lors des interactions sociales.

Ainsi, la suite du manuscrit s'articule autour de quatre chapitres portant sur les contributions théoriques et expérimentales obtenues au cours de cette thèse, et d'un dernier chapitre dans lequel nous discuterons de l'ensemble des résultats (Chapitre 6).

Nous nous intéresserons d'abord à l'évaluation même de l'improvisation socio-motrice. Pour cela, nous présenterons, dans le chapitre suivant, une revue de littérature de méthodes de mesure connues et employées à l'heure actuelle pour évaluer la créativité motrice et la coordination entre des mouvements (Chapitre 2). Ces méthodes d'analyses dépendent des caractéristiques même des mouvements. L'apparition de tâches plus écologiques, comme les tâches d'improvisation, obligent les chercheurs à repenser les méthodes d'analyses des signaux. Ainsi, nous recenserons les principales variables utilisées dans la littérature et apporterons de nouveaux outils adaptés aux signaux plus riches et complexes. Les méthodes utilisées au cours cette thèse sont par ailleurs explicitées et détaillées dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous analyserons comment l'improvisation socio-motrice peut être améliorée. En effet, plusieurs études montrent que l'expertise en activités d'arts augmente la performance dans des tâches simples d'improvisation socio-motrice. Ces résultats suggèrent ainsi que la créativité et la coordination dépendent des capacités initiales mais aussi du vécu et de l'expérience des individus. Néanmoins, aucune étude ne s'est, à l'heure actuelle, intéressée aux mécanismes permettant une telle amélioration. L'improvisation socio-motrice étant présente durant les interactions sociales, il semble important de comprendre comment ces capacités peuvent être renforcées afin d'améliorer ces interactions.

Après avoir investigué le comportement moteur interpersonnel dans le chapitre précédent, nous nous intéresserons ici à l'influence de cette improvisation socio-motrice sur le comportement moteur intra-personnel (Chapitre 4). Plus précisément, nous regarderons la posture de chaque individu, essentielle dans les interactions sociales. En effet, la posture sous-tend nos actions tout en étant influencée par elles. Ainsi, les coordinations intra-personnelles posturales des individus réalisant une tâche d'improvisation socio-motrice seront étudiées dans le but d'évaluer l'impact d'une telle situation sur la stabilité posturale.

Finalement, dans un dernier chapitre expérimental (Chapitre 5), nous étudierons dans quelle mesure la pathologie schizophrénique perturbe les capacités d'improvisation socio-motrice et donc leurs interactions sociales. Nous évaluerons ici le comportement

moteur des personnes souffrant de schizophrénie à travers la créativité et la coordination motrice dans une tâche d'improvisation.

Chapitre 2

Revue méthodologique

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Bardy, B. G., & Marin, L. (en prép). A methodological review for investigating motor coordination and creativity. *Journal of Motor Behavior*.

Slowinski, P., Zhai, C., Alderisio, F., Salesse, R. N., **Gueugnon, M.**, Marin, L., Bardy, B. G., di Bernado, M., & Tsaneva-Atanasova, K. (2016). Dynamic similarity promotes interpersonal coordination in joint action. *Journal of Royal Society Interface*. doi: 10.1098/rsif.2015.1093

Gueugnon, M., Marin, L., Zhao, Z., Schmidt, R. C., Lagarde, J., Bardy, B. G., & Salesse, R. N. (2013). Les méta-patterns de coordination : proposition d'une nouvelle taxonomie : proposition d'une nouvelle taxonomie appliquée aux coordinations motrices intra- et interpersonnelles. *15^{ème} Congrès International de l'ACAPS, 29-31 octobre. Grenoble, France. Communication affichée.*

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, nous essayons au cours de cette thèse d'investiguer les interactions sociales au travers d'une tâche d'improvisation socio-motrice, telle que le jeu en miroir. L'étude de l'improvisation, impliquant la créativité motrice des individus et la coordination entre les mouvements, n'a que très peu été investiguée, au détriment de l'analyse seule de la coordination à l'aide de tâches de mouvements relativement contraints. Néanmoins, la créativité étant un paramètre fondamental pour le succès de nos interactions, il semble nécessaire de l'analyser au même titre que la coordination. Les études relevant de l'approche dynamique ont principalement utilisé des mouvements rythmiques simples dans le but de comprendre et trouver des lois sur l'organisation comportementale et neurologique de l'émergence de la coordination. Les signaux obtenus sont majoritairement de nature stationnaire et périodique⁷. De fait, une méthodologie adaptée à ce type de signaux est apparue. L'analyse de la coordination de signaux plus complexes et non contraints, tels que ceux obtenus dans les tâches d'improvisation, nécessite toutefois l'utilisation de nouveaux outils. En effet, les propriétés stationnaires et périodiques de ces signaux sont compromises dénaturant ainsi la caractéristique même des signaux classiquement analysés dans la littérature. De plus, la créativité motrice – c'est-à-dire la complexité, la variété ou encore la richesse du répertoire des mouvements – nécessite également la mise en place d'une méthodologie adaptée à ce type de signaux, permettant de capturer l'essence même de cette créativité.

Avant d'investiguer l'improvisation à travers une tâche de production de mouvements, il semble nécessaire, voire indispensable, de faire une revue méthodologique des différents outils d'analyse pouvant être utilisés pour mesurer la créativité motrice et la coordination. L'objectif est ici de faire un état des lieux des variables pouvant mesurer ces deux composants dans une tâche d'improvisation socio-motrice. Nous nous concentrons, dans ce chapitre, sur les principales variables utilisées au sein du contrôle moteur et principalement dans l'approche des patrons dynamiques de coordination. Dans un premier temps, nous nous focalisons sur la créativité motrice et ses possibilités de mesure ; puis dans un second temps, nous nous intéressons aux outils permettant l'analyse de la coordination.

⁷ Une série temporelle est dite stationnaire si la moyenne et la dispersion ne varient pas au cours du temps (autrement dit, le contenu fréquentiel ne change pas au cours du temps). Une série temporelle est périodique lorsque le signal se répète à un intervalle régulier.

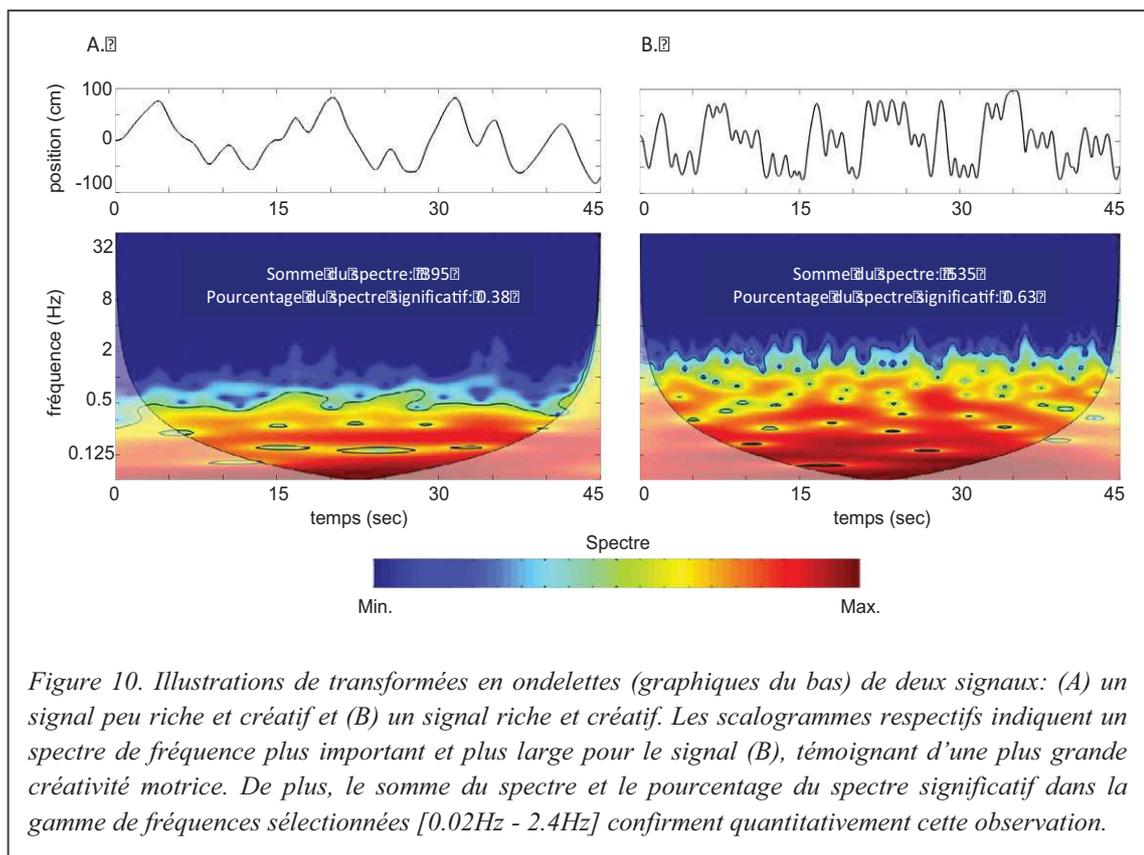
1. L'analyse de la créativité motrice

L'analyse de la créativité motrice n'a que peu été investiguée. En effet, les protocoles mis en place pour étudier les interactions sociales se sont majoritairement cantonnés à la production de mouvements mono-fréquentiels et d'amplitude fixe. Bien que ces études aient mesuré et trouvé une fréquence préférentielle d'oscillations propre à chaque individu, il est difficile d'estimer la créativité avec ce type de mouvements imposés. Néanmoins, lorsque les limites temporo-spatiales sont levées, les mouvements produits deviennent multi-fréquentiels et d'amplitudes variables. L'analyse de la forme même du signal, tout comme des modifications de fréquences et d'amplitude témoignent, en partie, de la créativité motrice des personnes. Nous allons ainsi voir dans cette section, différents outils permettant l'évaluation de la créativité motrice.

1.1. La transformée en ondelettes

Une investigation poussée du contenu fréquentiel d'un signal au cours du temps semble indispensable afin de mesurer la créativité motrice. Récemment, plusieurs auteurs ont démontré la pertinence et les bienfaits de *la transformée en ondelettes* plutôt que d'autres analyses temps-fréquence (Issartel, Bardainne, Gaillot, & Marin, 2015; Issartel, Marin, Gaillot, Bardainne, & Cadopi, 2006b). Ces auteurs expliquent que la transformée en ondelettes, préalablement utilisée en sismologie ou géophysique (Morlet, 1983; Torrence & Compo, 1998), est particulièrement adaptée aux signaux non-stationnaires observés chez l'Homme. Quelques études l'ont notamment utilisée dans l'analyse de signaux musculaires ou cérébraux (De Carli et al., 2004; De Michele, Sello, Carboncini, Rossi, & Strambi, 2003), et plus récemment dans l'analyse du mouvement humain (Issartel et al., 2006a; Issartel et al., 2006b; Varlet et al., 2011). Contrairement aux autres méthodes d'analyse temps-fréquence, la transformée en ondelette est basée sur une décomposition du signal à résolution multiple. Malgré le principe d'incertitude d'Heisenberg dictant que la localisation de la fréquence augmente quand l'incertitude dans le temps diminue (et inversement), cette méthode permet une localisation temporelle précise des événements à haute et basse fréquence, c'est-à-dire à court et long terme (Grinsted, Moore, & Jevrejeva, 2004). En d'autres termes, la taille de la fenêtre d'analyse augmente ou diminue en fonction de la gamme de fréquences (i.e., dilatation/contraction). Cette fenêtre se contracte (i.e., devient étroite) pour des

comportements à petite échelle ou haute fréquence ; et elle se dilate (i.e., devient large) pour des comportements à grande échelle ou basse fréquence. Deux paramètres sont à prendre en compte lors de l'utilisation de cette méthode : (i) la *fonction mère* qui correspond à la fenêtre d'analyse utilisée et (ii) *l'ordre*, c'est-à-dire le nombre de périodes présentes pour cette fonction mère. Il existe plusieurs fonctions mères, telles que l'ondelette de « Morlet », « Mexican Hat » ou « Daubechie ». Le choix de cette fonction mère tout comme du paramètre d'ordre dépend de la série temporelle d'origine⁸. D'après Issartel et collaborateurs, l'ondelette de « Morlet » avec un ordre de 8 est recommandée pour l'analyse de signaux humains (Issartel et al., 2006b, 2015). Au cours de ce travail, nous utiliserons ces choix de paramètres. L'analyse en ondelette donne une carte temps-fréquence d'un signal, également appelé scalogramme (Flandrin, 1988 ; Figure 10.).



Cette carte permet d'observer le contenu fréquentiel en fonction du temps (le spectre de fréquence). Plus la couleur tend vers les couleurs chaudes (rouge) et plus la

⁸ Pour plus de détails sur cette méthode, voir Issartel et al., 2006b et Issartel et al., 2015.

fréquence considérée est présente dans le signal. De part et d'autre du scalogramme, les effets de bords sont représentés par les zones incurvées transparentes permettant de délimiter les endroits pour lesquels la décomposition spectrale est imprécise. Les lignes noires, entourant certaines zones, représentent les fréquences significativement présentes dans le signal (voir Torrence & Compo, 1998). De manière très simple, le test statistique, inspiré d'un Chi2 (χ^2), est réalisé sur chaque point (pour chaque fréquence et à chaque instant) du spectre. Lorsque le spectre est supérieur à l'intervalle de confiance (ici 95%), cette valeur est considérée comme statistiquement significative. Une matrice de valeur numérique de significativité est ainsi obtenue (Issartel et al., 2015). Une analyse qualitative et visuelle des scalogrammes peut être effectuée. Sur cette figure, deux transformées en ondelettes sont illustrées : celle d'un signal composé de peu de fréquences et d'amplitudes différentes (Figure 10. A.) et celle d'un signal comprenant plusieurs fréquences et amplitudes (Figure 10. B.). Les scalogrammes obtenus nous permettent, tout d'abord, de réaliser une analyse visuelle qualitative du contenu fréquentiel des signaux. Nous constatons notamment que le spectre de fréquences du second signal est plus grand et plus large que celui du premier. Plus ce spectre est grand et de couleur chaude, et plus le signal peut être considéré comme riche, complexe et varié. Le second signal semble ainsi témoigner d'une plus grande créativité.

Une analyse quantitative du contenu fréquentiel peut également être effectuée à partir des scalogrammes. Le spectre est, en effet, composé d'une matrice de coefficients qu'il est possible d'extraire. Plusieurs méthodes d'extractions de ce contenu sont réalisables (Issartel et al., 2015). Il est par exemple possible de ne s'intéresser (i) qu'à une seule fréquence donnée, (ii) à plusieurs fréquences distinctes, (iii) à la fréquence la plus présente à chaque instant, (iv) ou encore à une gamme de fréquences prédéfinies (Issartel et al., 2006b, 2015; Schmidt et al., 2014). La sélection d'une gamme de fréquences recouvrant l'ensemble des fréquences présentes dans tous les signaux semble particulièrement adaptée pour l'analyse de la créativité motrice. Néanmoins, la méthode d'extraction à utiliser dépend du protocole et des hypothèses proposées en amont. Dans notre exemple (Figure 10.), une fenêtre [0.02Hz – 2.4Hz] permet d'englober l'ensemble des fréquences des deux signaux. L'extraction de la matrice correspondant à cette fenêtre de fréquence permet de prendre en compte l'ensemble des fréquences présentes à chaque instant dans le signal. Basée sur cette matrice, la *somme du spectre de puissance* (SomSpectre) peut être calculée. Elle témoigne de la présence et de la puissance de l'ensemble des fréquences du signal, quantifiant la créativité

motrice. Plus cette valeur est importante et plus les fréquences sont nombreuses et présentes dans le signal révélant ainsi une plus grande créativité.

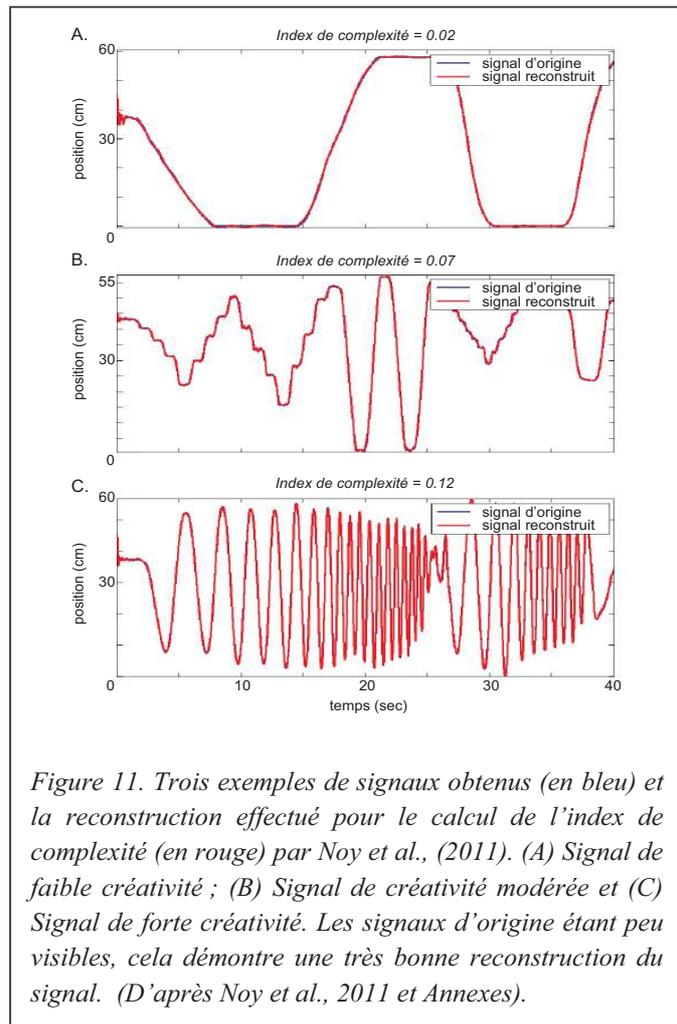
Une seconde variable peut être utilisée afin de témoigner de la créativité. Il s'agit du *pourcentage du spectre significatif* (PSS). Elle représente le taux de fréquences significatives présentes dans la gamme de fréquences sélectionnées. Le nombre de fréquences significatives présentes dans le contenu fréquentiel du signal est d'abord extrait de la matrice numérique de significativité. Une fois moyennée puis divisée par le nombre maximal d'éléments présents dans cette fenêtre, un pourcentage est obtenu, exprimé en valeur décimale, compris entre 0 et 1. Plus cette valeur est proche de 1, plus le signal contient des fréquences significatives dans la bande de fréquence, et plus le signal est complexe. Le spectre significatif est ainsi plus large et rend compte d'une plus forte créativité. Les résultats obtenus sur ces deux variables confirment notre inspection visuelle : le second signal est plus riche et varié témoignant d'une plus grande créativité motrice (Figure 10.). D'autres variables, comme le nombre et la durée des fréquences dominantes peuvent être extraites de cette analyse. Néanmoins, elles semblent moins adaptées puisqu'elles ne capturent pas spécifiquement la créativité globale des signaux.

1. 2. L'index de complexité

D'autres variables capturent la créativité motrice. C'est le cas par exemple de l'index de complexité (*IndC*). Proposé par Noy et collaborateurs (2011), dans l'une des premières études sur l'improvisation motrice, l'index de complexité se base justement sur la transformée en ondelettes. Mais cette fois-ci, il s'agit de *la transformée en ondelette inverse*. Contrairement à la transformée en ondelettes précédemment expliquée, la transformée inverse permet non pas la décomposition d'un signal, mais au contraire, la reconstruction de ce signal. La complexité d'un signal repose ainsi sur la reconstruction de ce signal à l'aide des ondelettes. La largeur de l'ondelette est modulée à l'aide de coefficients. Les 512 premiers coefficients sont utilisés pour reconstruire le signal. Le coefficient sélectionné est le premier pour lequel l'erreur médiane entre la reconstruction et la série originale est inférieure à 2mm (valeur choisie empiriquement). L'index obtenu correspond au rapport entre le numéro du coefficient utilisé pour reconstruire 95% du signal d'origine et la longueur du signal d'origine (voir Noy et al., 2011 et leur annexe pour plus d'informations). Ainsi, plus cet index est élevé et plus le mouvement est considéré comme complexe et créatif. La figure 11 illustre la précision

de la reconstruction et rend également compte de l'efficacité de cette variable afin de comparer la créativité entre plusieurs mouvements.

De manière intéressante, ces auteurs ont montré que cet index de complexité était corrélé aux jugements subjectifs des séries temporelles. Pour faire cela, les auteurs ont demandé à dix personnes naïves d'évaluer la complexité du signal sur une échelle allant de 1 à 3 : 1 correspondant à une faible complexité, 2 à une complexité intermédiaire et 3 à une forte complexité. Ces deux mesures, respectivement objective et subjective, tendent vers les mêmes résultats confirmant au passage la pertinence de l'index de complexité dans l'évaluation de la créativité motrice.



1. 3. La vitesse et l'amplitude

D'autres variables, plus intuitives, peuvent également servir de mesures de créativité. C'est le cas par exemple de la *vitesse maximale* – V_{max} – utilisée par Noy et collaborateurs (2011). Elle témoigne de la richesse des mouvements puisqu'elle est fortement liée au spectre de vitesses réalisées pendant le mouvement. En règle générale, plus la valeur est haute, plus le spectre de vitesse est large et plus les mouvements sont riches. La vitesse maximale donne des résultats comparables à ceux obtenus à l'aide de l'index de complexité. La *somme des vitesses absolues* peut également être un bon indicateur de la richesse des mouvements. Une forte somme des vitesses absolues indique une complexité, une créativité motrice plus importante.

Des variables similaires peuvent également être extraite de la position ou de l'amplitude du mouvement. Une *amplitude maximale* témoigne, le plus souvent, d'un spectre d'amplitudes de mouvements plus large et donc d'une variété, d'une créativité plus importante. La *distance totale du mouvement* atteste aussi de la complexité et de la richesse du mouvement. Plus la distance est importante et plus la quantité de mouvements produite est grande. La table 1 regroupe les valeurs de ces 4 différentes variables mesurées sur les deux différents signaux précédemment utilisés pour les transformées en ondelettes de la figure 10.

	Vitesse max. (m.sec ⁻¹)	Somme vitesses absolues (m.sec ⁻¹)	Amplitude max. (m)	Distance totale (m)
Signal A peu riche et peu créatif	0.47	1300	1.65	12.10
Signal B riche et créatif	1.40	3924	1.73	38.60

Table 1. Calcul de la vitesse maximale, de la somme des vitesses absolues, de l'amplitude maximale et de la distance totale des signaux observés sur la figure 10. Les valeurs de ces quatre variables sont supérieures pour le signal B, montrant une créativité motrice supérieure pour ce signal.

Cet exemple permet de confirmer l'utilité de ces variables afin de quantifier et comparer la complexité d'un signal reflétant la créativité motrice. Bien qu'étant deux aspects importants de la créativité, la vitesse et l'amplitude ne permettent pas de capturer l'ensemble de la créativité. Une grande amplitude maximale peut, dans certains cas, ne pas attester d'une plus grande créativité. Prenons par exemple le cas des signaux analysés dans la Table 1. Au niveau de l'amplitude maximale, le signal A est quasi comparable au signal B, pouvant indiquer une créativité motrice équivalente. Néanmoins, les vitesses maximales (Table 1.), la somme du spectre et le pourcentage de spectre significatif (Figure 10.) des deux signaux révèlent au contraire que le signal B est beaucoup plus complexe et créatif que le signal A. À l'instar de l'amplitude, la vitesse peut également induire en erreur. Il est possible d'observer une vitesse maximale équivalente entre deux signaux, alors que l'un est beaucoup plus créatif que l'autre. Nous préconisons ainsi de considérer la vitesse et l'amplitude comme variables additionnelles et complémentaires, afin de renforcer des résultats obtenus sur des variables plus représentatives telles que le pourcentage de spectre significatif, la somme du spectre ou l'index de complexité.

Pour résumer, la créativité motrice peut être mesurée au travers des différentes variables précédemment détaillées. Ces outils sont particulièrement adaptés à des situations de productions motrices, comme le jeu en miroir, où la créativité motrice est perçue comme la variété, la richesse des mouvements réalisés. Elles permettent une mesure quantitative de la créativité confirmant ainsi certaines impressions visuelles ou subjectives. Par ailleurs, d'autres variables telles que la quantification du nombre de gestes, de mouvements réalisés pendant une discussion permettent également de rendre compte de la richesse des mouvements produits. C'est le cas par exemple de l'*analyse d'énergie de mouvements* (voir Ramseyer & Tschacher, 2006; Tschacher & Ramseyer, 2009). Basée sur l'analyse vidéo, cette méthode permet la mesure de la quantité de mouvements d'une région d'intérêt précise ou du corps entier. Elle capture le nombre de pixels différents entre deux images successives d'un enregistrement vidéo. Cette variable correspond ainsi grossièrement à la valeur absolue de la vitesse de déplacement des segments capturés par la vidéo. Contrairement aux tests et questionnaires, ces mesures ne sont pas subjectives et qualitatives, mais permettent d'obtenir une série temporelle représentant la quantité de mouvements produits durant une interaction. Cette méthode tout comme les tests et mesures psychologiques (i.e., Motor-Affective-Social-Scale, Trémeau et al., 2008 ; Del-Monte et al., 2013) ne sont toutefois pas appropriés pour l'analyse de la créativité des mouvements volontaires dans une tâche de production motrice. En effet, elles ne permettent pas de quantifier objectivement et précisément la complexité, la variété des mouvements. Elles ne seront de ce fait pas plus détaillées. A présent qu'un état des lieux des outils permettant l'évaluation de la créativité a été réalisé, nous explorons, dans la section suivante, comment la coordination entre deux mouvements peut être mesurée.

2. L'analyse de la coordination motrice

Nous allons voir dans cette partie les différentes méthodes couramment utilisées en contrôle moteur pour analyser la synchronisation entre deux signaux. Ces outils, majoritairement utilisés au sein de l'approche des patrons dynamiques de coordination, ne peuvent s'appliquer que sur des signaux stationnaires et périodiques (Issartel et al., 2006b ; Schmidt & Richardson, 2008). Ils ne sont donc pas adaptés pour des mouvements à fréquences et amplitudes variables, comme dans le cas du jeu en miroir

(Noy et al., 2011). Toutefois, nous nous intéressons, dans un premier temps, aux outils couramment utilisés pour l'analyse de la coordination motrice entre des signaux stationnaires, afin de présenter dans un second temps les mesures permettant l'analyse de la coordination entre des mouvements plus complexes.

2. 1. Signaux stationnaires et périodiques

2. 1. 1. Causalité de Granger

Pour qu'il y ait coordination entre deux mouvements, il faut qu'un couplage soit présent. La *causalité de Granger* permet justement de témoigner de la présence de ce couplage. Plus spécifiquement, elle rend compte de la force et de la direction du couplage entre deux signaux. Ce concept repose sur leur prédiction : si les valeurs passées d'un signal X permettent une meilleure prédiction du signal Y, que celle obtenue en se basant uniquement sur les valeurs passées de Y, alors le signal X *cause* le signal Y (Granger, 1969; Wiener, 1956). Le formalisme proposé par Granger permet de quantifier la prédiction d'un signal par un autre et donc l'intensité du couplage. La causalité de Granger est généralement calculée à l'aide d'un modèle linéaire (supposant ainsi la linéarité et la stationnarité des signaux analysés⁹). Plus spécifiquement, cette méthode est basée sur les modèles linéaires autorégressifs permettant de prédire la valeur d'un signal à partir de ces valeurs précédentes, perturbées par un bruit blanc (Hamilton, 1994). Un modèle autorégressif univarié décrit un signal en terme de combinaisons linéaires des valeurs précédentes de ce même signal. Soient X et Y, deux séries temporelles et leur modèle autorégressif univarié respectif :

$$X(t) = \sum_{j=1}^p A_{1j} \times X(t-j) + E_1(t) \qquad Y(t) = \sum_{j=1}^p A_{2j} \times Y(t-j) + E_2(t)$$

où p est le nombre maximal de valeurs précédentes, A_1 et A_2 les paramètres des modèles respectifs de X et de Y. E_1 et E_2 correspondent aux bruits blancs gaussiens, appelés *résidus* respectifs des signaux X et Y. Afin de mesurer si la prédiction du signal Y peut

⁹ Des méthodes ont été développées pour mesurer la causalité de Granger sur des signaux non-stationnaires et non-linéaires (Ding, Chen, & Bressler, 2006). Un fenêtrage des données a été proposé (Freiwald et al., 1999) tout comme une *Extension de la causalité de Granger* (Chen, Rangarajan, Feng, & Ding, 2004).

être améliorée en incorporant les valeurs passées de X, il faut exprimer le signal Y en fonction de Y et de X en utilisant le modèle suivant :

$$Y(t) = \sum_{j=1}^p A_{21j} \times Y(t-j) + \sum_{j=1}^p A_{22j} \times X(t-j) + E_{2+1}(t)$$

La comparaison des variances des résidus permet alors de rendre compte de la causalité de Granger. Si la variance de E_{2+1} obtenue à l'aide du modèle précédent est supérieure à celle de E_2 obtenue avec le modèle univarié, alors le signal X *cause* le signal Y. Un simple test de comparaison de variance (*F de Fisher*) permet de valider cette différence. Le logarithme de la valeur du F obtenu correspond alors à l'intensité de la causalité de Granger. Plus cette valeur est importante et plus le signal Y est couplé au signal X. Afin de mesurer l'influence de Y vers X, il suffit d'inverser les X et les Y dans une formule équivalente à la précédente. Une comparaison entre les valeurs obtenues pour ces deux causalités permet de rendre compte de la direction du couplage. Si la causalité de X vers Y est plus importante que celle de Y vers X alors, le couplage est asymétrique et indique que le signal Y est plus influencé par X que inversement.

2. 1. 2. Phase relative

Une fois le couplage observé, la coordination entre les deux signaux peut être mesurée. Au sein de l'approche dynamique, une variable a rapidement émergé: la *phase relative*. En plus de rendre compte de l'organisation spatio-temporelle des oscillateurs (i.e., individus ou membres d'un même individu), elle permet également d'observer les phénomènes de transition de phases, c'est-à-dire de transition d'un patron de coordination à un autre (phase vers antiphase par exemple). Elle illustre un décalage de phase entre les signaux, exprimé en radians ou degré. Plusieurs méthodes existent à l'heure actuelle pour calculer cette phase relative (Hamill, McDermott, & Haddad, 2000).

- *Phase relative discrète par estimations de points*

La première méthode de calcul de la phase relative repose sur *l'estimation par points*. Il s'agit d'une analyse discrète de la phase relative entre les mouvements de

deux oscillateurs (Kelso, 1995; Schmidt & Richardson, 2008; Zanone & Kelso, 1992). Son calcul s'effectue aux points de rebroussement des signaux, c'est-à-dire aux pics maximaux et minimaux locaux de chaque série temporelle. L'estimation des points de rebroussement permet le calcul de deux données importantes: la latence entre les deux oscillateurs et la période de chaque oscillateur, notées respectivement l et P . La latence l représente la différence temporelle entre le mouvement d'un oscillateur (pris pour référence) et le même mouvement du second oscillateur, comme par exemple, la latence entre les extensions de jambes des deux individus (Schmidt et al., 1990). La période P correspond, quant à elle, à la différence temporelle entre deux mêmes mouvements d'un même oscillateur pris pour référence (i.e., un cycle de mouvements), telle que la période entre deux extensions de jambes d'un même individu. Le calcul de la phase relative discrète par estimation de points se fait de la manière suivante :

$$\phi_{rel} = \frac{l}{P} \times 360^\circ$$

La latence l est divisée par la période P , puis multipliée par 360° afin d'obtenir une phase relative en degré. Bien qu'intéressante, cette première méthode ne permet pas de rendre compte de l'organisation spatio-temporelle des mouvements des individus à chaque instant de l'essai mais donne une estimation ponctuelle de la coordination. Ainsi, les chercheurs de cette approche ont développé une nouvelle méthode permettant un calcul continu de la phase relative (Kelso, 1995; Pikovsky, Rosenblum, & Kurths, 2001).

- *Phase relative continue*

La phase relative continue est obtenue à l'aide du calcul de différence de phase des deux oscillateurs: $\phi_{rel} = \phi_1(t) - \phi_2(t)$; où $\phi_1(t)$ et $\phi_2(t)$ représentent respectivement la phase à l'instant t de l'oscillateur 1 et de l'oscillateur 2. Deux méthodes de calcul de la phase angulaire continue, et donc de la phase relative, ont largement été utilisées.

Premièrement, *la méthode de l'arc tangent*. La phase angulaire continue est ici calculée par l'arc tangent du rapport entre la vitesse, $x'(t)$, et la position, $x(t)$, à chaque instant t .

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{x'(t)}{x(t)}\right)$$

Même si cette méthode a souvent été utilisée, plusieurs auteurs ont montré ses limites (Peters, Haddad, Heiderscheit, Van Emmerik, & Hamill, 2003; Varlet & Richardson, 2011). En effet, il serait recommandé de normaliser la vitesse par la période moyenne des oscillations afin d'obtenir des résultats corrects (Peters et al., 2003). Malgré tout, cette méthode ne permettrait pas de prendre en compte les fluctuations de fréquences de mouvements propres aux mouvements humains, mêmes rythmiques.

Ainsi, une méthode alternative basée sur la *transformée de Hilbert* a été introduite afin de s'adapter au mieux à ces modifications de fréquences d'oscillations (Pikovsky et al., 2001). Sans rentrer dans les détails mathématiques et algorithmiques de la transformée de Hilbert, il s'agit d'une transformation linéaire d'un signal réel dans le domaine complexe : elle exprime ainsi le signal en deux parties, une partie réelle notée $s(t)$ et une partie imaginaire notée $H(t)$. Le calcul de l'angle de la phase continue repose cette fois-ci sur l'arc tangent du rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire du signal :

$$\phi(t) = \arctan\left(\frac{s(t)}{H(t)}\right)$$

Néanmoins, une étude a récemment démontré les limites de cette méthode avec la présence de modifications de fréquences d'oscillations (Varlet & Richardson, 2011). Ces auteurs ont ainsi proposé une nouvelle manière de calculer la phase angulaire continue dans le but d'obtenir une phase relative continue adaptée à ces modulations de fréquences. Basée sur la méthode de l'arc tangent, ils ont cette fois-ci introduit une normalisation de la vitesse, non pas par la période moyenne du signal, mais par la demi-période présente entre chaque points de rebroussement. En d'autres termes, le calcul de la phase angulaire continue est réalisé sur chaque demi-cycle avec une normalisation de la vitesse du signal par la période du demi-cycle respectif (i.e., différence temporelle entre un pic maximum et un pic minimum). Les auteurs ont testé et démontré la robustesse de cette méthode, même lorsque les fréquences à l'intérieur même d'un cycle et entre les cycles étaient modulées, contrairement aux deux autres méthodes précédentes.

Le calcul de la phase relative permet de rendre compte de la coordination mais donne également la possibilité aux expérimentateurs de modéliser leurs résultats. Cette modélisation s'effectue à l'aide des résultats obtenus de la phase relative et des modèles

théoriques préexistants, comme le modèle HKB (Haken et al., 1985). Toutefois, l'estimation de la phase angulaire de chaque oscillateur, nécessaire pour le calcul de la phase relative continue, diffère des phases observées en théorie créant ainsi un décalage entre la pratique et la théorie. Afin d'éviter cela, Kralemann et collaborateurs (2007, 2008) ont proposé d'intégrer une nouvelle étape et variable : la *protophase*. La protophasse, particulièrement adaptée aux situations d'interaction faible ou moyenne, nécessite la quasi-périodicité des signaux mais pas obligatoirement la stationnarité. Elle correspond à l'estimation de la phase d'un signal à l'aide de la transformée de Hilbert. Une fois obtenue, la protophasse est transformée en phase afin de la faire correspondre avec celle observée en théorie¹⁰. La phase relative continue est ensuite obtenue par la différence de phase entre les deux oscillateurs. Cette méthode permet, entre autres, une meilleure comparaison entre les résultats obtenus et les modèles théoriques.

L'utilisation de la phase relative requiert ainsi quelques présupposés sur les signaux à analyser. Plus la forme des signaux s'éloigne de celle d'un sinus, et plus l'utilisation de la phase relative est délicate. Si les signaux sont stationnaires et périodiques, l'utilisation de la phase relative continue (quelque soit la méthode) est conseillée. Si au contraire, les signaux présentent de légères fluctuations de fréquences d'oscillations, la méthode développée par Varlet & Richardson (2011) semble donner de meilleurs résultats. Plusieurs auteurs conseillent plutôt d'utiliser la phase relative discrète lorsque les mouvements s'éloignent trop d'oscillations périodiques (Fuchs et al., 1996; Peters et al., 2003). Toutefois, si les signaux ne correspondent plus du tout à des oscillations périodiques, le calcul de la phase relative telle que nous l'avons détaillée dans cette partie, n'est plus pertinent. Nous détaillerons, plus tard dans le manuscrit, une méthode, basée sur l'*analyse en ondelettes croisées*, permettant d'extraire une phase relative entre des signaux présentant de grandes modifications de fréquence et d'amplitude (Issartel et al., 2006b). Finalement, la phase relative permet de témoigner du patron de coordination adopté par les oscillateurs, de la précision et de la stabilité de cette coordination. La précision est généralement calculée à l'aide de la moyenne circulaire ou de la médiane circulaire de la phase relative. La stabilité est, quant à elle, quantifiée à l'aide de la variabilité (variance ou écart-type circulaire), de la distribution d'occurrences de la phase relative ou des fluctuations critiques. D'autres

¹⁰ Pour plus d'informations sur l'ensemble de la méthode, voir Kralemann, Cimponeriu, Rosenblum, & Pikovsky, 2008.

variables complémentaires sont également utilisées afin d'obtenir des informations sur le degré de synchronisation.

2. 1. 3. Index de synchronisation et dwell-time

L'*index de synchronisation* et le *dwell-time* dérivent tous deux de la phase relative. Ils permettent d'obtenir des informations complémentaires quant à la présence et la stabilité de la coordination. L'index de synchronisation (*IS*) prend en compte les fluctuations de la coordination sur des échelles temporelles courtes, par exemple au sein même d'un cycle de mouvements (Kelso, de Guzman, Reveley, & Tognoli, 2009; Mormann, Lehnertz, David, & Elger, 2000). Cet index est basé sur la variance circulaire, *VC*, de la phase relative (Rosenblum, Pikovsky, Kurths, Schäfer, & Tass, 2001; Tognoli, Lagarde, DeGuzman, & Kelso, 2007). Elle se définit généralement comme :

$$IS = \frac{1}{N} \left| \sum_{t=1}^N e^{i(\phi_1(t) - \phi_2(t))} \right| = 1 - VC$$

où *N* correspond au nombre de points sélectionnés ; $\phi_1(t)$ et $\phi_2(t)$ représentent respectivement la phase à l'instant *t* de l'oscillateur 1 et de l'oscillateur 2 et *VC* la variance circulaire de la phase relative. La variance est une mesure de dispersion, de stabilité d'une variable. Une variance proche de 0 indique que toutes les valeurs sont identiques et une variance de 1 indique une forte dispersion entre les valeurs. L'*IS* fournit ainsi une valeur entre 0 (absence de synchronisation) à 1 (synchronisation parfaite).

Le *dwell-time* correspond, quant à lui, au pourcentage de temps qu'un système reste dans un état donné (Kelso et al., 2009). Cette variable permet ainsi de mesurer la stabilité de la coordination. Il faut empiriquement choisir un seuil pour lequel les variations de la phase relative ne vont pas être tolérées. Le pourcentage de temps où les variations de la phase relative ne dépassent pas le seuil indiqué correspond alors au *dwell-time*. Comme pour l'index de synchronisation, il est possible de fenêtrer les données (i.e., *N*) afin de ne s'intéresser qu'à la stabilité d'un patron et non de la coordination complète, permettant ainsi de discriminer les périodes de coordination instable (Kelso et al., 2009).

2. 1. 4. Comparaison de fréquences

Dans le cadre de signaux périodiques et mono-fréquentiels, une comparaison de fréquence permet également de rendre compte de la coordination entre les signaux. Cette méthode – appelée *recouvrement spectral de puissance (RSP)* ou « *power spectral overlap* » – mesure le pourcentage de fréquences communes des signaux. Elle témoigne de la force de la coordination entre deux signaux (Oullier, Bardy, Stoffregen, & Bootsma, 2002). Une fois le paysage fréquentiel de chaque signal obtenu à l’aide de la transformée de Fourier, l’aire d’intersection entre les deux courbes de puissance spectrale est extraite et définit le RSP (Figure 12.). Cette méthode a notamment été utilisée pour évaluer la coordination non-intentionnelle entre les mouvements des doigts de deux personnes (Oullier et al., 2008). Ces derniers montrent que le RSP est plus important lorsque les sujets voient les mouvements de l’autre participant que lorsqu’ils réalisent les mouvements les yeux fermés (Figure 12.). Ce résultat témoigne ainsi de l’émergence de la coordination entre les mouvements des deux personnes.

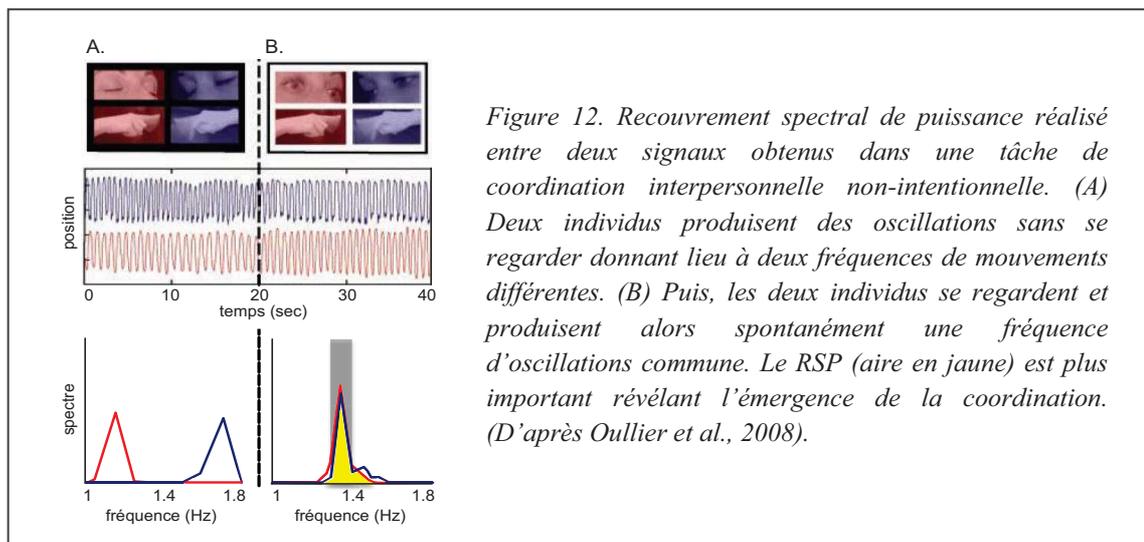


Figure 12. Recouvrement spectral de puissance réalisé entre deux signaux obtenus dans une tâche de coordination interpersonnelle non-intentionnelle. (A) Deux individus produisent des oscillations sans se regarder donnant lieu à deux fréquences de mouvements différentes. (B) Puis, les deux individus se regardent et produisent alors spontanément une fréquence d’oscillations commune. Le RSP (aire en jaune) est plus important révélant l’émergence de la coordination. (D’après Oullier et al., 2008).

L’ensemble de ces variables d’analyse de la coordination ne peut être appliqué qu’aux signaux stationnaires et périodiques. Elles conviennent ainsi parfaitement aux expériences dans lesquelles les participants produisent des oscillations de fréquence et d’amplitude fixes. Néanmoins, la tendance progressive des recherches vers des paradigmes expérimentaux plus écologiques pousse les chercheurs à développer de nouveaux outils, permettant l’analyse de la coordination entre des mouvements plus complexes. Nous allons à présent voir différentes variables pouvant être utilisées aussi

bien pour des signaux stationnaires et périodiques¹¹ que pour des signaux non-stationnaires et/ou non-périodiques.

2. 2. Signaux non-stationnaires et/ou non-périodiques

2. 2. 1. L'entropie de transfert

À l'instar de la causalité de Granger, l'*entropie de transfert* ne renseigne pas directement sur la coordination entre deux signaux (également appelés variables) mais elle permet de quantifier leur échange d'information. En d'autres termes, elle évalue la force et la direction du couplage entre deux variables (Schreiber, 2000). Comme son nom l'indique, cet outil se base sur l'*entropie*, notion développée notamment par Shannon (1948). L'entropie d'un signal X , notée $H(X)$, mesure la quantité d'information délivrée par le signal ou l'incertitude liée à la prédiction des réponses du signal. Si l'information donnée par la variable est toujours la même, alors l'incertitude et l'entropie sont minimales puisque la quantité d'information délivrée est faible. À l'inverse, si l'information donnée par le signal est changeante, la quantité d'information délivrée est alors importante, illustrée par de fortes incertitude et entropie. Ainsi, l'entropie rend indirectement compte de la prédictibilité du signal. Plus l'entropie est grande et moins le signal est prédictible. Le calcul de l'entropie prend en compte la probabilité p_i d'observer chaque réponse possible du signal $1/p_i$:

$$H(X) = \sum_{i=1}^N p_i \times \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right)$$

Si deux variables X et Y interagissent, la réponse du signal X peut être en partie prédite par le signal Y , illustrant un échange d'informations. L'*entropie conditionnelle* du signal Y étant donné X , notée $H(Y|X)$, témoigne de l'entropie provenant du signal Y , c'est-à-dire de la prédiction du signal Y basée sur les valeurs précédentes de ce signal. Elle se calcule par la différence entre l'entropie conjointe de Y et X , notée $H(Y, X)$, et de l'entropie de X . L'*entropie conjointe* réfère, elle, à la quantité d'information contenues dans le système de X et Y . L'entropie de transfert de X vers Y , notée $TE_{X \rightarrow Y}$,

¹¹ Nous conseillons, toutefois, d'utiliser les variables précédemment détaillées dans le cas de signaux stationnaires et périodiques. Ces mesures, plus utilisées dans la littérature, permettent ainsi une comparaison avec les résultats obtenus dans des recherches précédentes.

se calcule à l'aide d'une différence d'entropies conditionnelles (Korjus, 2011; Kostrubiec, Dumas, Zanone, & Kelso, 2015). Elle représente l'information permettant la prédiction de Y_i provenant seulement de $Y_i^{(k)}$ moins l'information provenant de $Y_i^{(k)}$ et de $X_i^{(m)}$:

$$TE_{X \rightarrow Y} = H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)}) - H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)}, X_i^{(m)})$$

où i représente un instant donné, τ un délai temporel, k des valeurs passées de Y et m des valeurs passées de X . L'estimation de τ , k et m est importante et peut affecter le résultat de l'entropie de transfert¹². L'entropie de transfert peut être perçue comme l'information contenue dans X permettant de prédire le futur de Y , au-delà de la prédiction faite depuis les valeurs passées de Y (Barnett, Barrett, & Seth, 2009; Prokopenko, Lizier, & Price, 2013). Si la valeur d'entropie de transfert obtenue est nulle alors les deux signaux sont indépendants. Dans notre exemple, cela signifie que les deux entropies de $H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)})$ et de $H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)}, X_i^{(m)})$ sont équivalentes, indiquant que la prédiction du signal Y , par les valeurs k passées de Y , n'est pas améliorée sachant les valeurs m précédentes du signal X . Si la valeur obtenue est positive, les deux signaux échangent alors de l'information. Cela indique que l'entropie $H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)})$ obtenue est supérieure à celle du second terme $H(Y_{i+\tau} | Y_i^{(k)}, X_i^{(m)})$. Ainsi, les valeurs passées de X permettent alors d'améliorer la prédiction du signal Y au-delà de la prédiction faite par les seules valeurs précédentes de Y . Le signal Y est donc influencé par le signal X . Plus cette valeur est importante et plus fort est le couplage entre les deux signaux. L'entropie de transfert est asymétrique : afin de calculer l'entropie de transfert de Y vers X , il suffit d'inverser les X et les Y dans la formule précédente. Une comparaison entre les valeurs obtenues pour ces deux entropies de transfert permet de rendre compte de la direction du couplage. Cette méthode a été utilisée dans l'analyse de signaux cérébraux (Vicente, Wibral, Lindner, & Pipa, 2011), mais aussi dans le cadre des coordinations interpersonnelles (Kostrubiec et al., 2015). Dans cette étude, l'entropie de transfert a notamment été utilisée afin de mesurer le couplage entre les mouvements d'un agent virtuel, animé par un modèle HKB revisité, et d'un individu lors d'une tâche

¹² Pour plus d'informations sur l'estimation de ces paramètres, voir Korjus, 2011; Kostrubiec et al., 2015; Vicente, et al., 2011.

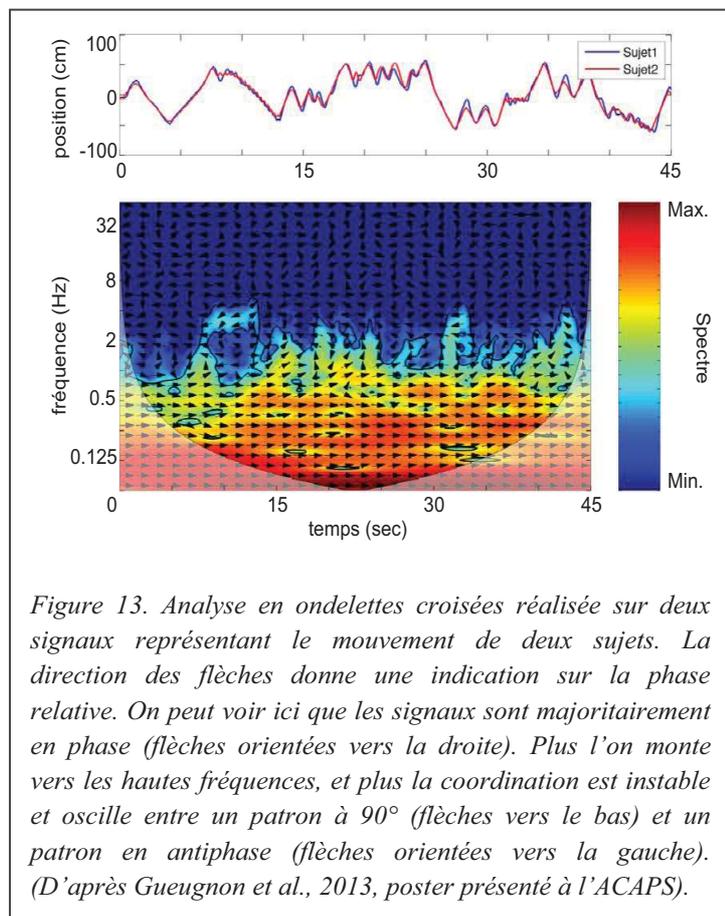
d'apprentissage de coordination interpersonnelle. L'information donnée par cette variable a permis de savoir comment le participant était couplé à l'avatar pendant l'apprentissage d'une coordination.

2. 2. 2. L'analyse en ondelettes croisées

- *Phase relative continue*

Basée sur la transformée en ondelette précédemment décrite, *l'analyse en ondelettes croisées* permet de mesurer l'interaction entre deux signaux, même s'ils sont complexes et non-stationnaires. Elle se définit par le produit entre le nombre complexe du signal 1 et le conjugué complexe du signal 2 (voir Issartel et al., 2006b, 2015 pour plus de détails). Elle évalue le spectre de fréquences croisé, c'est-à-dire le contenu fréquentiel commun des deux signaux. L'avantage de cette méthode est qu'elle donne accès à la différence de phase entre les deux signaux à chaque instant et pour chaque fréquence donnée. En d'autres mots, elle renseigne de la phase relative continue entre les deux signaux pour chaque fréquence. Tout comme la transformée en ondelettes, un

scalogramme permet une analyse visuelle du contenu fréquentiel commun aux deux signaux (Figure 13.). Les lignes noires révèlent ici les fréquences significativement présentes dans les deux signaux. Le scalogramme donne également accès à la phase relative à l'aide des flèches pointant à droite, en bas, à gauche correspondant respectivement à une phase relative proche de 0° , 90° et 180° (Torrence & Compo, 1998; Grinsted et al., 2004). Dans notre figure, nous



pouvons par exemple noter que la coordination entre les signaux est majoritairement proche de 0° , mais que plus la fréquence augmente et moins la coordination est stable et oscille entre 90 et 180° (pour les hautes fréquences aux environs de 1-2 Hz). À l'instar de l'analyse en ondelette, il est possible de recueillir des variables d'intérêts, comme la phase relative. Il est possible de l'extraire (i) pour une seule fréquence donnée, (ii) à la fréquence la plus présente à chaque instant, (iii) ou encore de moyenniser à chaque instant l'ensemble des phases relatives sur une fenêtre de fréquences choisies. Cette dernière semble la plus pertinente et la plus adaptée aux mouvements non-stationnaires et pluri-fréquentiels puisqu'elle englobe l'ensemble des fréquences présentes dans le signal et témoigne ainsi, de la coordination globale entre les deux signaux. Une fois la phase relative extraite, il est possible de calculer la précision et la stabilité de la coordination, tout comme l'index de synchronisation et le dwell-time (cf. Chapitre 2. 2. 1. 3.).

- *Cohérence spectrale croisée*

La transformée en ondelettes croisées de deux signaux permet également de mesurer la *cohérence spectrale croisée* (Grinsted et al., 2004). Cette variable témoigne de la corrélation entre deux signaux dans l'espace temps-fréquence. A l'origine, la corrélation entre deux signaux (i.e., *corrélacion croisée*) mesure une relation linéaire entre ces signaux, c'est-à-dire si les signaux co-varient dans le temps. Elle nécessite néanmoins la stationnarité des données. Afin de passer outre ce prérequis, une méthode de corrélation croisée fenêtrée a été développée (Boker, Xu, Rotondo, & King, 2002). Elle a notamment été utilisée pour mesurer la synchronisation entre les mouvements de deux personnes mais également la direction de cette coordination (Ramseyer & Tschacher, 2011). Cependant, cette technique ne serait pas assez efficace pour des signaux pluri-fréquentiels et non-stationnaires (Issartel et al., 2006b). L'utilisation de la transformée en ondelettes croisées permet de s'affranchir de cela et de mesurer la cohérence spectrale croisée. Cette variable est calculée à l'aide du spectre croisé obtenu avec la transformée en ondelette croisée, et du spectre de chaque signal (voir Grinsted et al., 2004 pour plus de détails arithmétiques). Une carte temps-fréquence, similaire à celle obtenue lors de la transformée en ondelettes croisées classique, permet de représenter les corrélations entre deux signaux à chaque instant et pour chaque fréquence présente dans le signal. Les zones significatives sont également entourées d'un trait noir. La couleur témoigne, cette fois-ci, de la cohérence entre les deux

signaux. Une couleur rouge représente une valeur de cohérence proche de 1, c'est-à-dire une corrélation parfaite entre les deux signaux alors qu'une couleur bleue représente une cohérence proche de 0 illustrant une absence de corrélation entre les deux signaux. Ces cartes temps-fréquences donnent également la phase relative entre les deux signaux. L'extraction de la cohérence peut elle aussi se faire des différentes manières, à l'image de la phase relative précédemment détaillée. Par exemple, Schmidt et collaborateurs (2014) ont mesuré la cohérence à chaque instant pour des gammes de fréquences bien distinctes. Néanmoins, l'extraction de la cohérence sur l'ensemble des fréquences observées semble plus appropriée pour rendre compte de la cohérence globale entre les deux signaux. Il est également possible de mesurer la cohérence spectrale moyennée au pic maximal de la fréquence dominante des signaux (Richardson et al., 2005; Schmidt & O'Brien, 1997; Schmidt et al., 2012). Cette dernière ne prend en compte que la fréquence dominante des signaux, et indique si les signaux partagent la même fréquence majeure (et donc sont fortement corrélés) ou s'ils présentent des fréquences totalement différentes (absence de corrélation). La cohérence est généralement utilisée pour des situations où la coordination est relative (comme pour des tâches de coordination non-intentionnelles où le couplage est faible et la coordination intermittente).

2. 2. 3. Différences temporelles et différences de position

À l'instar des corrélations croisées donnant un délai temporel, une simple différence temporelle peut être utilisée pour rendre compte de la coordination entre deux comportements moteurs. Noy et collaborateurs (2011) ont, par exemple, mesuré un délai temporel – dT – entre deux signaux dans une tâche d'improvisation socio-motrice. Soit un meneur et un suiveur étaient désignés dans la condition Meneur-Suiveur (MS), soit aucun rôle n'était prédéfini dans la condition Improvisation Jointe (IJ). Afin de s'adapter au caractère non-stationnaire des données obtenues dans le jeu en miroir, une segmentation des signaux est au préalable réalisée. Basée sur les moments où la vitesse est nulle (représentant les points de rebroussement de position), la segmentation permet de mesurer ce délai temporel pour chaque sous-mouvement. Un sujet est désigné comme référence : pour la condition MS, le est la référence et le sujet 1 est la référence dans la condition IJ. Les segments du participant de référence sont ensuite appariés avec les segments correspondants de l'autre participant. La différence temporelle absolue est ensuite calculée pour chaque segment et moyennée afin de

rendre compte de la coordination globale entre les deux sujets (Noy et al., 2011). Plus cette valeur est faible, meilleure est la synchronisation. Certains paramètres sont, toutefois, à définir empiriquement : la durée et le déplacement minimum d'un sous-mouvement, et le délai maximal d'appariement des segments.

Dans une tâche similaire d'improvisation socio-motrice (jeu en miroir), nous avons également introduit une nouvelle mesure : l'*erreur de position relative* (Slowinski et al., 2016; EPR). Il s'agit d'une variable évaluant la correspondance temporelle entre deux mouvements complexes et non-stationnaires coordonnés. Plus spécifiquement, elle évalue la différence de positions entre deux signaux capturant comment un sujet reproduit et imite les mouvements d'un autre sujet. Elle n'est ainsi préconisée que dans une condition Meneur-Suiveur, où l'un des sujets est désigné comme meneur. L'EPR prend en compte la direction des signaux. Si deux

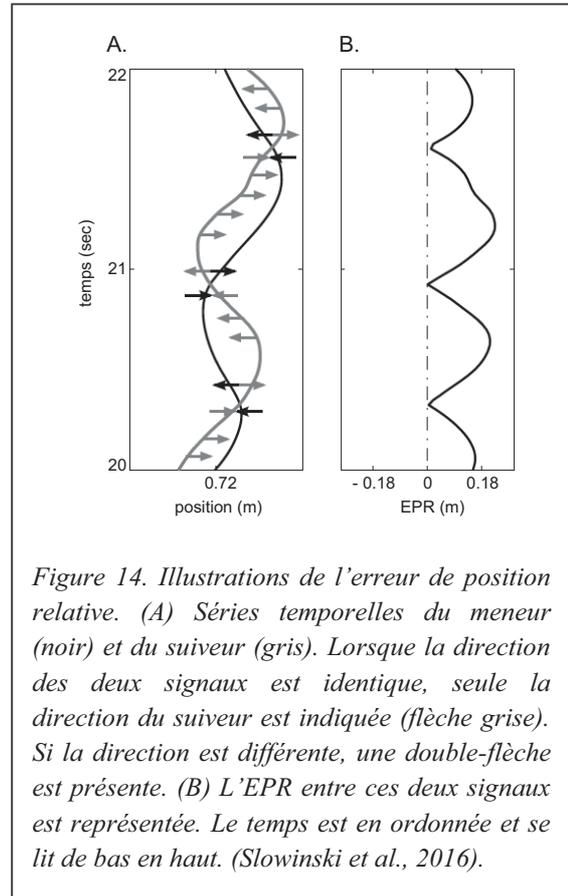
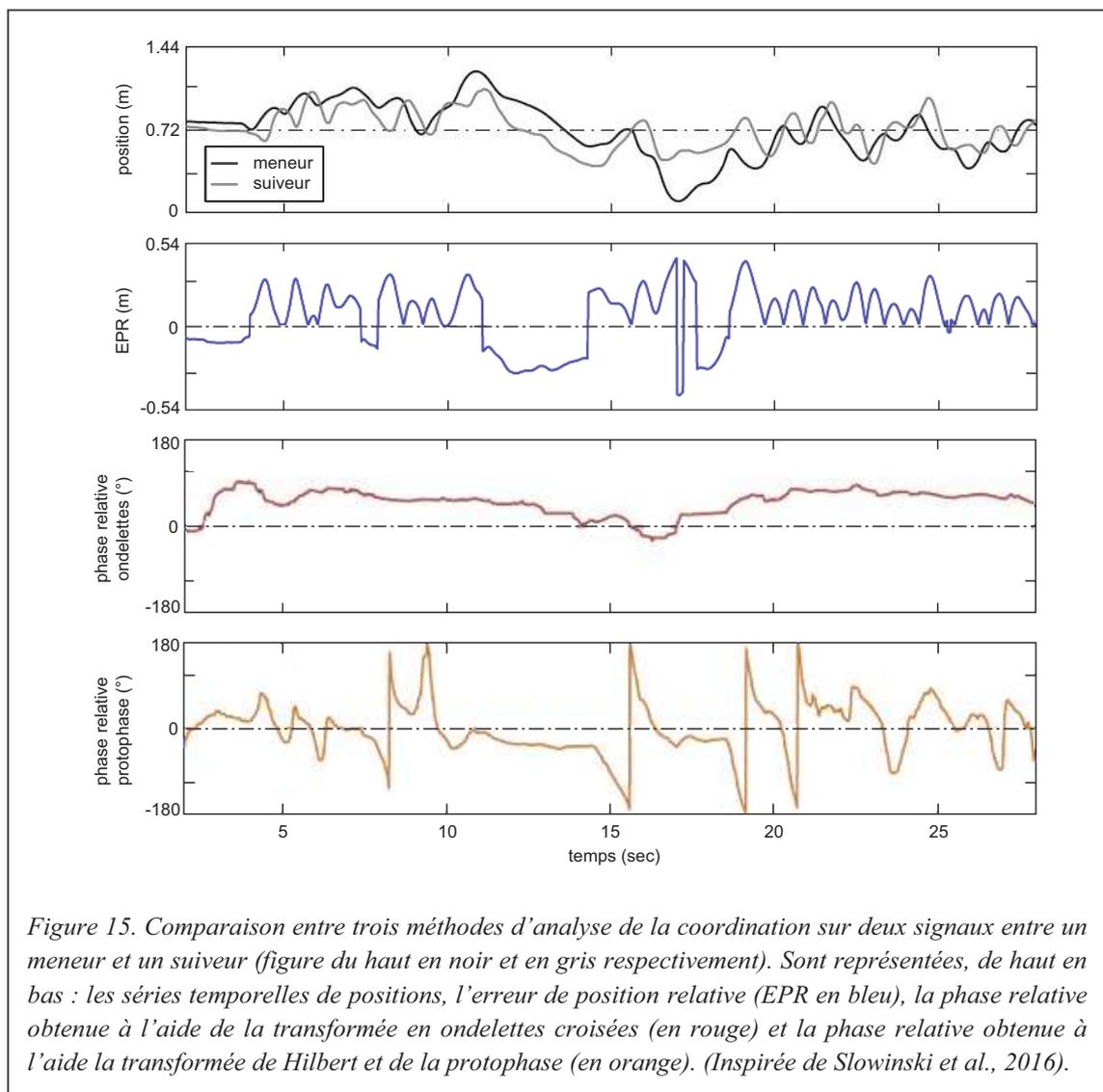


Figure 14. Illustrations de l'erreur de position relative. (A) Séries temporelles du meneur (noir) et du suiveur (gris). Lorsque la direction des deux signaux est identique, seule la direction du suiveur est indiquée (flèche grise). Si la direction est différente, une double-flèche est présente. (B) L'EPR entre ces deux signaux est représentée. Le temps est en ordonnée et se lit de bas en haut. (Slowinski et al., 2016).

objets (les mouvements d'un meneur et d'un suiveur) se déplacent dans la même direction, alors le changement de direction est initié par le meneur. Cette règle permet ainsi de prendre en compte la direction du mouvement à l'aide du signe de la vitesse. Deux cas de figures sont alors pris en compte pour le calcul de l'EPR (Figure 14.). Si la direction des mouvements est identique (i.e., produit des signes des vitesses égal à 1) alors l'EPR se calcule par la différence de position multipliée par le signe de la vitesse. C'est le cas par exemple lorsque seule la direction du mouvement du suiveur (illustrée par une flèche grise) est indiqué sur la Figure 14. A. Si au contraire, la direction des mouvements est différente, l'EPR est alors calculée par la différence absolue de position, considérant que le meneur initie toujours les changements de direction et que le suiveur est derrière le meneur (double-flèche noire et grise ; Figure 14. A.). Une valeur positive de l'EPR indique que le suiveur est en retard et suit les mouvements du

meneur. Une valeur négative peut être observée et indique que le suiveur est en avance par rapport au meneur.

Nous avons comparé cette variable avec deux autres méthodes précédemment détaillées : (i) la phase relative calculée sur la transformée de Hilbert et la protophase et (ii) la phase relative obtenue à l'aide de la transformée en ondelettes croisées (Figure 15.).



Le premier graphique représente les séries temporelles de position analysées : le meneur est en noir et le suiveur en gris. Viennent ensuite l'erreur de position relative (en bleu), la phase relative calculée à l'aide de la transformée en ondelettes croisées (en rouge) et celle calculée à l'aide de la transformée de Hilbert et de la protophase (en

orange). Tout d'abord, la comparaison entre les deux phases relatives nous informe que celle obtenue à l'aide de la transformée en ondelettes croisées est plus adaptée à nos signaux puisque le signe de la phase relative indique bien que le sujet désigné comme meneur est bien en avance sur le suiveur. La comparaison de cette dernière avec l'EPR nous indique une allure globale similaire pour ces deux variables. Néanmoins, des comportements différents sont également visibles. Par exemple, entre la 10^{ème} et la 15^{ème} seconde, l'EPR atteste que le suiveur est cette fois-ci en avance ($EPR < 0$) alors que la phase relative ne montre aucun changement de rôle. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'EPR est calculée à chaque instant tandis que l'estimation de la phase relative est basée sur la transformée en ondelette dont la localisation temporelle dépend de la fréquence et est limitée par le principe d'incertitude (Grinsted et al., 2004). Il s'agit également d'une portion où les sujets n'oscillent plus, rendant les calculs des phases et donc de la phase relative délicats.

À partir de notre analyse et de l'exemple vu précédemment, l'EPR semble mieux adaptée aux signaux obtenus dans une tâche d'improvisation dans laquelle un meneur est clairement désigné. La phase relative obtenue à l'aide de la transformée en ondelettes croisées est également intéressante mais moins précise dans des situations où l'extraction de la fréquence d'oscillation est rendue difficile par la nature même du signal. Néanmoins, afin de comparer une condition où un meneur est prédéfini et une autre où il n'y en a pas, le délai temporel dT semble le plus approprié (Noy et al., 2011). En effet, cette dernière variable mesure un délai temporel absolu entre les signaux, permettant ainsi de mesurer la synchronisation quelle que soit la condition expérimentale.

2. 2. 4. L'analyse de quantification de récurrence croisée

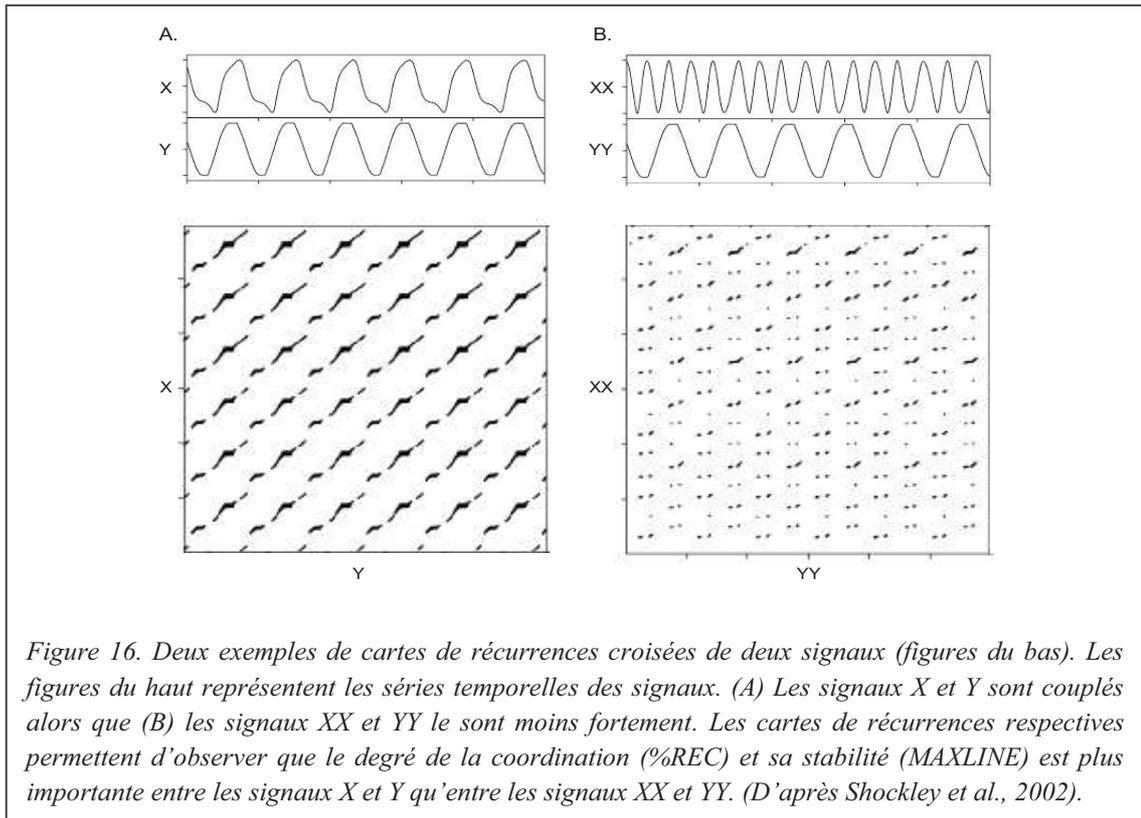
Finalement, une dernière variable, utilisée pour rendre compte de la coordination entre deux mouvements, est basée sur *l'analyse de quantification de récurrence croisée* (« *cross-recurrence quantification analysis* » ; CRQA). Cet outil, basé sur la théorie du chaos, permet d'évaluer le degré de couplage, d'interaction entre deux signaux (Marwan, Thiel, & Nowaczyk, 2002; Shockley, Butwill, Zbilut, & Webber, 2002). Elle rend ainsi compte d'une estimation de la coordination en révélant les instants où la trajectoire du signal 1 est proche de celle du signal 2. La CRQA permet l'obtention

d'une matrice de distance (D) à partir d'une différence entre deux séries temporelles (x et y) illustrant la distance entre les deux trajectoires en fonction de deux paramètres: la *dimension* (m) et le *décalage temporel* (τ) :

$$D_{i,j} = \sqrt{\sum (x_{i+m\tau} - y_{j+m\tau})^2}$$

Plusieurs outils permettent l'estimation de ces deux paramètres comme l'algorithme des faux-voisins proches ou la fonction d'information mutuelle (Cao, 1997; Kantz & Schreiber, 1997). Par exemple, une dimension de 5 et un décalage de 1 signifie que les trajectoires des deux signaux sont comparées entre cinq points consécutifs à chaque instant. Une fois cette matrice obtenue, chaque valeur est comparée à un troisième paramètre – appelé *radius* ε – correspondant à une distance seuil. Le radius permet de considérer ou non la trajectoire d'un signal comme étant proche de celle de l'autre signal¹³. La *fonction Heaviside* est ensuite utilisée afin d'obtenir une matrice binaire où 0 indique une distance supérieure à la valeur seuil ε et où 1 représente une distance inférieure à ε . Une valeur égale à 1 représente donc les récurrences observées entre les deux signaux, c'est-à-dire la corrélation entre les trajectoires de ces signaux à cet instant. Une carte de récurrence croisée, basée sur cette matrice permet une évaluation qualitative de la coordination (Figure 16.). Chaque axe correspond à un signal à chaque instant (graphiques du bas). Deux exemples sont illustrés ici : une situation où deux signaux sont couplés (Figure 16. A.) et une situation où deux signaux sont plus faiblement couplés (Figure 16. B.).

¹³ Voir Marwan, Romano, Thiel, & Kurths (2007), p.247 pour la méthode d'estimation du radius ainsi qu'une revue complète et détaillée de la CRQA.



Chaque point noir visible sur la carte correspond à un point de récurrence entre les deux signaux. Parmi plusieurs variables d'intérêts, deux sont couramment utilisées pour rendre compte de la coordination entre les signaux. Le pourcentage de récurrence (%REC) représente la densité des points de récurrence dans la matrice. Il est calculé par le ratio entre le nombre total de points de récurrence observés et le nombre total de points possibles. Plus cette valeur est importante et plus les signaux partagent une même trajectoire et sont donc coordonnés. La seconde variable – appelée MAXLINE – correspond au temps maximum où les deux signaux maintiennent des trajectoires communes. Elle indique la force du couplage, la stabilité de la coordination (Ramenzoni, Davis, Riley, Shockley, & Baker, 2011; Ramenzoni, Riley, Shockley, & Baker, 2012). Plus MAXLINE est importante et plus la coordination entre les signaux est forte. Dans notre exemple, les valeurs obtenues pour ces deux variables confirment l'impression visuelle donnée par les cartes de récurrences croisées : les signaux X et Y sont plus coordonnés (%REC \approx 2.7 et MAXLINE \approx 23) que les signaux XX et YY (%REC \approx 0.7 et MAXLINE \approx 10 ; Shockley et al., 2002). La CRQA a, par exemple, été utilisée afin de mesurer les coordinations posturales entre deux sujets (i.e., coordination interpersonnelle), mais aussi de chaque individu (Ramenzoni et al., 2011, 2012;

Shockley, Baker, Richardson, & Fowler, 2007; Shockley et al., 2009; Shockley et al., 2003). Son utilisation semble particulièrement convenir aux coordinations relatives. Bien qu'intéressante, puisque non dépendante des propriétés du signal, cette analyse ne permet pas de rendre compte du patron de coordination émergent (contrairement au calcul de phase relative classique).

L'ensemble de ces méthodes d'analyse, couramment utilisées au sein du contrôle moteur, permet de rendre compte de la coordination entre deux signaux. Les dernières méthodes présentent l'avantage de ne pas nécessiter de prérequis sur la stationnarité ni sur la linéarité des données. Elles peuvent ainsi être appliquées sur des signaux simples, mais aussi sur des signaux complexes obtenus dans des situations moins contraintes, telles que les situations d'improvisation socio-motrices.

3. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de rendre compte de la diversité des méthodes d'analyses utilisées pour mesurer la créativité motrice et la coordination. Ces deux paramètres, importants dans le cadre de l'analyse des interactions sociales, n'ont que peu été étudiés conjointement. En effet, la majorité des études s'est focalisée sur des protocoles où les mouvements étaient contraints et a donc rendu compte du seul phénomène de coordination. Plusieurs outils, dont la phase relative ou le recouvrement de puissance spectrale, ont alors été introduits permettant l'évaluation de la synchronisation entre ces mouvements. Cependant, ces méthodes sont adaptées au caractère stationnaire et périodique des signaux obtenus. L'émergence de tâches, dans lesquelles les mouvements se rapprochent des situations d'interactions sociales quotidiennes, a quelque peu changé la donne sur l'utilisation de ces méthodes. D'autres méthodes ont ainsi été introduites, comme les différences temporelles ou de position ou encore l'analyse en ondelettes croisées, dans le but de mesurer la coordination entre ces signaux non-stationnaires. L'apparition de ces tâches plus écologiques a également permis l'analyse de la complexité, de la richesse des mouvements. Cette complexité, reflétant la créativité motrice, peut être analysée à l'aide de variables simples telles que la vitesse maximale ou la longueur totale du mouvement, mais nécessite une analyse

plus poussée basée sur la décomposition et la reconstruction du signal à l'aide de l'analyse en ondelette.

A l'aube d'investiguer l'improvisation socio-motrice, cette revue méthodologique semblait fondamentale pour mieux comprendre les possibilités existantes dans l'analyse de la créativité et de la coordination pour ce type de données. La revue méthodologique réalisée au cours de ce travail s'est limitée aux méthodes et outils couramment utilisés en contrôle moteur pour les tâches décrites précédemment. Il semble, finalement, nécessaire d'ajouter que le choix des variables utilisées doit se faire en fonction du paradigme utilisé et des données obtenues, mais aussi en fonction des hypothèses et des points d'intérêts. Toutes ces méthodes possèdent des avantages et des défauts : il faut donc être précautionneux dans leur utilisation.

Résumé

L'objectif de ce chapitre était de faire un état des lieux des outils de mesures permettant d'extraire la créativité motrice et la coordination entre deux signaux.

Investiguer l'improvisation socio-motrice nécessite l'utilisation d'outils adéquats capturant la créativité et la coordination entre signaux. La créativité motrice peut être analysée à l'aide de la transformée en ondelettes mais aussi par des variables plus simples telles que la vitesse maximale. La coordination peut, elle, être mesurée à travers une erreur de position, un délai temporel ou une différence de phases (extraite de la transformée en ondelettes croisées).

Pour l'ensemble des chapitres expérimentaux suivants, nos signaux étaient de nature non-stationnaire et non-périodique (excepté pour certains dans le chapitre 3). Ainsi, plusieurs variables détaillées précédemment ont été utilisées dans ces chapitres.

	CREATIVITE		COORDINATION	
	<i>Variables utilisées</i>	<i>Justifications</i>	<i>Variables utilisées</i>	<i>Justifications</i>
Chapitre 3. IMPROVISATION & ACQUISITION	Index de complexité (IndC) Vitesse maximale (Vmax)	Utilisation de la méthode de Noy et al. (2011) afin de comparer nos résultats avec les leurs.	Index de synchronisation (IS; données stationnaires et périodiques) Délai temporel (dT)	Variable de mesure de la coordination non-intentionnelle. Utilisation de la méthode de Noy et al. (2011) afin de comparer nos résultats avec les leurs.
Chapitre 4. IMPROVISATION & POSTURE	Pourcentage du spectre significatif (PSS) via les ondelettes.	Introduction d'une nouvelle variable pour mesurer la créativité des signaux simples et complexes.	Phase relative via les ondelettes croisées. Cohérence spectrale croisée (CSC)	Variables les plus adaptées pour mesurer la coordination et le patron de coordination posturale obtenu.
Chapitre 5. IMPROVISATION & SCHIZOPHRENIE	Index de complexité (IndC) Somme du spectre de puissance (SomSpectre) via les ondelettes.	Variable couramment utilisée pour mesurer la créativité entre signaux complexes. Variable mesurant la complexité globale des signaux.	Erreur de position relative (EPR)	Variable la plus adaptée pour rendre compte de la coordination dans la condition Meneur-Suiveur.

Chapitre 3

Improvisation socio-motrice & Acquisition

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Coste, A., Zhao, Z., Bardy, B. G., & Marin, L., (2016). The acquisition of socio-motor improvisation in the mirror game. *Human Movement Science*. doi: 10.1016/j.humov.2015.12.005

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Zhao Z., Coste, A., Bardy, B. G., & Marin, L. (2015). Improvement of socio-motor competences : influence of synchronization on improvisation capacities. *16^{ème} Congrès International des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives*. 26-28 Octobre. Nantes, France. Communication orale.

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Bardy, B. G., Zhao, Z., Schmidt, R. C., & Marin, L. (2015). Enhancing socio-motor competences : impact of behavioural matching and behavioural synchrony. *18th International Conference of Perception & Action (ICPA)*. 14-18 Juillet. Minneapolis, MN, USA. Communication orale.

1. Introduction

Au travers des précédents chapitres, nous avons mis en évidence que l'improvisation socio-motrice permettait d'investiguer deux paramètres importants dans les interactions sociales quotidiennes : la créativité motrice et la coordination interpersonnelle. L'évaluation de ces deux paramètres, nécessitant une méthodologie adaptée à ce type de signaux, peut être effectuée à l'aide du *jeu en miroir* proposé par Noy et collaborateurs (2011). Ces auteurs ont exploré l'improvisation à travers deux conditions: Meneur-Suiveur (MS) où un sujet mène l'interaction pendant que le second suit les mouvements de l'autre ; et Improvisation Jointe (IJ) où il n'y a pas de consignes particulières sur les rôles des sujets. Ces auteurs ont montré que des experts en activités d'art possèdent de meilleures capacités d'improvisation que des novices : à savoir une meilleure créativité et une meilleure coordination. Les experts sont également meilleurs dans la condition IJ que dans la condition MS, contrairement aux novices qui sont meilleurs dans cette dernière condition. Des moments de parfaite synchronisation, comme ceux observés en art (Nachmanovtich, 1990; Seham, 2001), ont également été retrouvés entre les mouvements des experts dans la condition IJ, reflétant une signature de l'expertise. D'autres études ont également confirmé cet effet de l'expertise en art dans des tâches de coordinations motrices (Issartel et al., 2006a; Schmidt, Fitzpatrick, Caron, & Mergeche, 2011; Washburn et al., 2014). Par exemple, Washburn et collaborateurs ont exploré l'impact de l'expertise en danse sur la coordination interpersonnelle. Les participants (danseurs et non-danseurs) devaient se coordonner avec un confédéré réalisant, lui-même, trois séquences de mouvements dansés avec des degrés de difficulté différents. Ces auteurs ont observé que les danseurs se coordonnaient mieux avec le confédéré que les non-danseurs, et ce, même pour la séquence la plus complexe. Considérant l'expertise comme le résultat d'un processus d'acquisition et d'apprentissage, l'ensemble de ces résultats suggère que les capacités d'improvisation socio-motrice s'acquièrent. Toutefois, les mécanismes sous-tendant cette acquisition restent, pour l'heure, fortement méconnus. Dans le cadre des interactions sociales, améliorer le comportement moteur (créativité et synchronisation) et donc la communication non-verbale semble particulièrement intéressant. En effet, il est important de comprendre comment ces capacités peuvent être renforcées afin d'améliorer les interactions sociales, dans un but, par exemple, thérapeutique. Néanmoins, à notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à l'acquisition de ces

capacités, ni à l'influence ou aux rôles de la créativité et de la synchronisation interpersonnelle sur cette acquisition.

A l'instar de l'apprentissage d'un nouveau patron de coordination bi-manuelle, l'amélioration de ces capacités peut, elle aussi, dépendre des possibilités initiales de chaque individu (Zanone & Kelso, 1992; Zanone & Kostrubiec, 2004; Zanone, Kostrubiec, Albaret, & Temprado, 2010). Par exemple, les experts, ayant une plus grande expérience en improvisation, possèdent un répertoire de mouvements plus important et une capacité à se synchroniser plus marquée que les novices, pouvant expliquer leur meilleure performance dans des tâches motrices expérimentales. Toutefois, leur performance est-elle meilleure parce que les experts ont appris à créer des mouvements riches et complexes avec d'autres personnes et/ou parce qu'ils ont appris à se synchroniser avec d'autres personnes ? Autrement dit, est-ce que les experts ont de meilleures capacités d'improvisation car ils possèdent une plus grande créativité et/ou une plus grande capacité de synchronisation ?

Dans ce chapitre, nous présentons une expérience permettant d'investiguer l'acquisition des capacités d'improvisation socio-motrice. Plus précisément, nous nous demandons si la créativité et/ou la synchronisation peuvent permettre l'amélioration de ces compétences et en devenir un prédicteur. Nous avons ainsi proposé un protocole Pré-test/Post-test, avec des paires de novices en improvisation, afin d'observer, à l'aide du jeu en miroir (Noy et al., 2011), l'évolution de leurs capacités d'improvisation. Entre ces phases de tests, des sessions d'expositions étaient présentes dans le but de manipuler nos deux paramètres (Créativité et Synchronisation) dans une tâche motrice secondaire. Nous supposons que la créativité et la synchronisation permettent tous deux d'améliorer les capacités d'improvisation socio-motrices. En ce sens, nous postulons que les individus ayant réalisé des mouvements créatifs et synchronisés durant les phases d'expositions, verront leur capacité d'improvisation s'améliorer contrairement aux autres individus. Nous pensons spécifiquement observer une amélioration de la performance d'improvisation des novices vers celle des experts décrites dans la littérature, à savoir une amélioration de la condition IJ principalement.

2. Méthode

2.1. Participants

Quatre-vingt seize volontaires sains (âge moyen de 20.2 ans \pm 2.5) ont réalisé l'expérience. Il leur a d'abord été demandé quel sport ils pratiquaient. Seulement 3 personnes sur les 96 ont déclaré pratiquer la danse, mais aucun de ces participants n'a reporté une expérience d'improvisation en danse de plus de 10 ans (cf. Noy et al., 2011 pour une méthode similaire). Nous avons ainsi considéré ce nombre de participants trop petit pour influencer nos résultats, et avons donc maintenu ces 3 participants dans cette étude. Les participants ont ainsi été aléatoirement appariés en quarante-huit paires (22 paires homme-homme et 26 paires femme-femme) dans le but d'éviter un éventuel effet de la pratique sportive. Les paires ont ensuite été aléatoirement réparties en quatre groupes différents. Dans chacune des paires, les participants ne se connaissaient pas avant l'expérience. Tous possédaient une vue normale ou légèrement corrigée et étaient tous droitiers d'après le test de préférence manuelle d'Edinburgh (« *Edinburgh Handedness Inventory* »). L'ensemble des participants a signé un consentement respectant les règles de l'Université de Montpellier. L'expérience était conforme aux standards éthiques de la Déclaration d'Helsinki.

2.2. Set-up expérimental

Les participants se tenaient debout l'un en face de l'autre, à une distance de 1 mètre. Une fois en place, il leur était demandé de tenir un stick avec leur main droite. Ce stick, placé à une distance de 45 cm devant eux, était attaché à un fil de nylon tendu sur une longueur de 1.80 m. Le fil était positionné horizontalement à hauteur d'épaules. Un marqueur passif était collé sur le haut de chaque stick. Huit caméras infra-rouges (Nexus MX13 Vicon

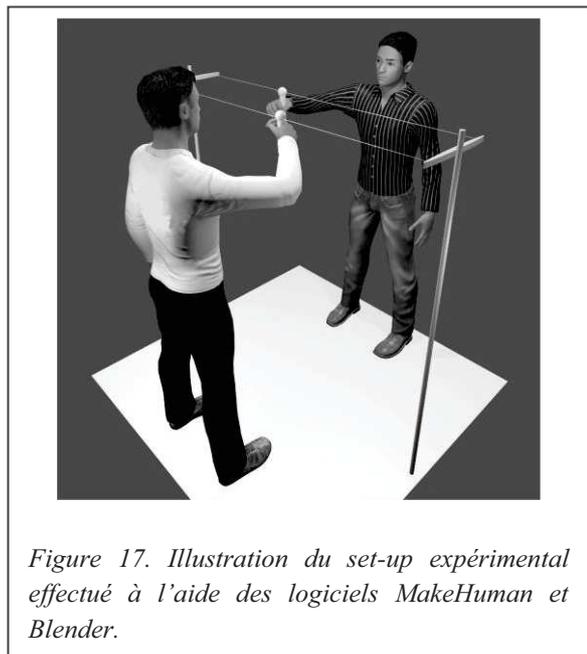


Figure 17. Illustration du set-up expérimental effectué à l'aide des logiciels MakeHuman et Blender.

System ©) étaient placées autour du set-up expérimental dans le but d'enregistrer la position du marqueur situé sur chacun de ces sticks. La position a alors été reconstruite dans les trois dimensions de l'espace avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz. La figure 17 représente le set-up expérimental.

2. 3. Procédure expérimentale

L'expérience était composée de cinq étapes. Dans trois d'entre elles, appelées *sessions de tests* (étapes 1, 3 et 5), les sujets devaient réaliser le jeu en miroir introduit par Noy et collaborateurs (2011). Entre ces sessions de tests, deux étapes de coordination non-intentionnelle, appelées *sessions d'exposition* (étapes 2 et 4), étaient réalisées. Chaque session de test durait 10 minutes. La première session d'exposition (étape 2) durait 10 minutes et la seconde (étape 4) 17 minutes. Une pause de 2 minutes entre chaque session était observée. Au total, l'expérience durait au minimum 1h15. Durant toute l'expérience, les participants n'étaient pas autorisés à discuter. La figure 18 illustre cette procédure expérimentale.

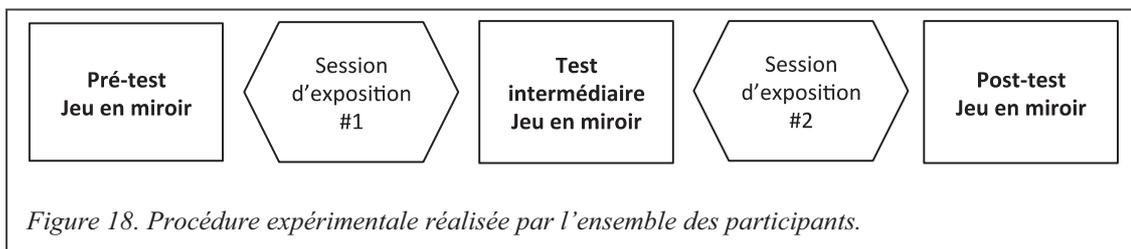


Figure 18. Procédure expérimentale réalisée par l'ensemble des participants.

2. 3. 1. Sessions d'exposition

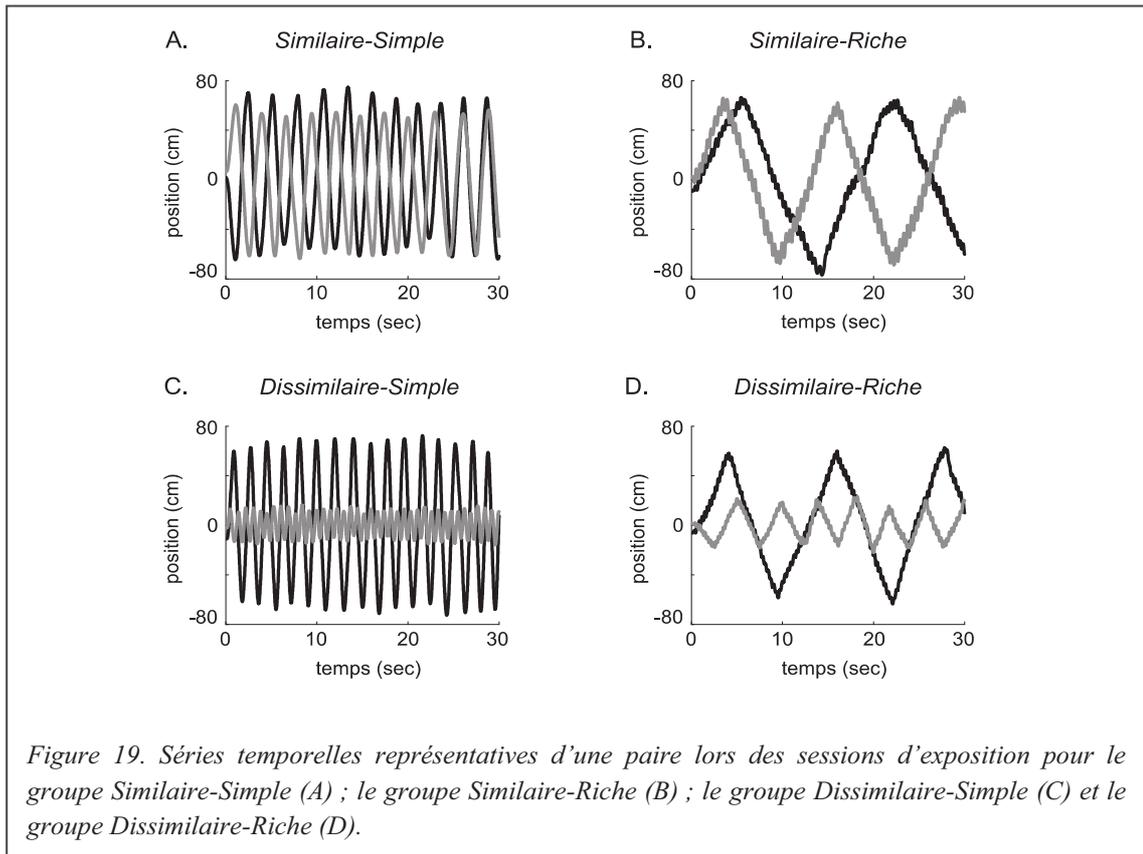
Pendant les étapes 2 et 4, les sujets devaient réaliser une tâche de coordination motrice non-intentionnelle dans laquelle chaque participant produisait des oscillations à fréquence préférentielle tout en regardant les mouvements de l'autre participant. Nous avons ici manipulé les mouvements des participants afin de jouer sur nos deux paramètres : la Synchronisation (i.e., Similaire ou Dissimilaire) et la Créativité (i.e., Simple ou Riche). Un design expérimental deux-par-deux a alors été utilisé.

La Synchronisation a été manipulée en modifiant l'amplitude de mouvements. Dans le groupe Similaire, les deux participants de chaque paire devaient produire des oscillations de même amplitude. A l'inverse, dans le groupe Dissimilaire, un sujet

réalisait des oscillations d'amplitude supérieure à sa largeur d'épaules alors que son binôme produisait des oscillations d'amplitude inférieure à sa largeur d'épaules. Ainsi, le mouvement produit par les participants du groupe Dissimilaire était différent en terme d'amplitude de celui qu'ils devaient regarder (i.e., le mouvement du second participant). Cette manipulation entraînait une asymétrie entre les mouvements produits par la main et les mouvements produits par les yeux de chaque sujet dans le groupe Dissimilaire, induisant une diminution de la synchronisation entre les participants (Varlet, Coey, Schmidt, & Richardson, 2012). Dans cette étude, les auteurs ont également manipulé l'amplitude de mouvement du stimulus dans une tâche de coordination non-intentionnelle entre une personne et un point affiché sur un écran. Ils ont alors démontré que l'amplitude du stimulus influençait la synchronisation et ont conclu que la différence d'amplitude entre le mouvement des yeux et le mouvement des mains réduisait cette synchronisation.

La Créativité a été manipulée au travers du nombre de fréquences contenues dans le mouvement, dans le but ne pas influencer la synchronisation. Nous avons ainsi demandé aux participants de produire soit une oscillation simple et naturelle (groupe Simple), soit un mouvement composé de deux oscillations de fréquences différentes (groupe Riche). Les participants de ce dernier groupe devaient produire une double oscillation en ajoutant une oscillation à haute fréquence sur leur oscillation naturelle. Nous sommes partis du principe que (i) des mouvements multi-fréquentiels sont plus riches et plus créatifs que des mouvements mono-fréquentiels et que (ii) produire une double oscillation fournit un répertoire de mouvements plus dense que de n'en produire qu'une seule.

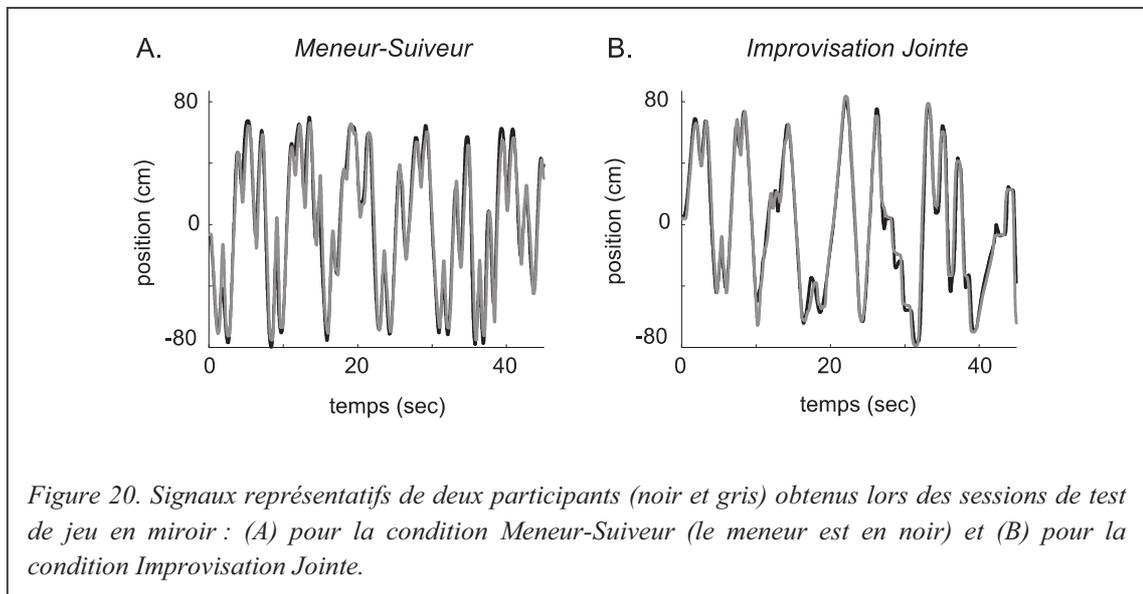
Chaque paire a été attribuée aléatoirement à l'un des quatre groupes, résultant de la combinaison de nos manipulations de la synchronisation et de la créativité. La figure 19 illustre les mouvements produits dans ces quatre groupes. La première session d'exposition (étape 2) incluait trois essais d'1 minute et la seconde, sept essais d'1 minute (étape 4).



2. 3. 2. Sessions de test : jeu en miroir

Dans le but de mesurer l'évolution des compétences d'improvisation, trois sessions de jeu en miroir sont réalisées par les paires de sujets (i.e., Pré-test ; Test intermédiaire et Post-test). La tâche de jeu en miroir ressemblait à celle proposée et utilisée par Noy et collaborateurs (2011). Les participants avaient pour instructions de « créer des mouvements complexes, variés et intéressants tout en restant le plus coordonnés possible » en déplaçant le stick qu'ils tenaient le long du fil. Deux conditions ont été réalisées. Dans la condition *Meneur-Suiveur* (MS), un participant, désigné comme étant le meneur, devait improviser alors que le second participant devait suivre les mouvements du leader. Dans la condition *Improvisation Jointe* (IJ), il n'y avait pas de meneur ni de suiveur pré-désignés. Un échange de rôle spontané est alors observé (Noy et al., 2011). La figure 20 illustre les séries temporelles obtenues dans ces deux différentes conditions. Chaque participant d'une paire a réalisé deux essais en tant que meneur, deux essais en tant que suiveur et deux essais en Improvisation Jointe dans chaque session de test. L'ordre des conditions était contrebalancé mais restait le même entre les trois sessions de test. Après plusieurs essais réalisés lors d'une expérience

pilote, nous avons choisi une durée d'essai optimale de 45 secondes de mouvement effectif suivies de 45 secondes de repos dans le but de maintenir la motivation des participants et d'éviter l'apparition de la fatigue.



2. 4. Traitement des données

Pour toutes les étapes de l'expérience, les déplacements des deux sticks sur l'axe transversal ont été extraits, recentrés autour de 0 et filtrés à l'aide d'un filtre Butterworth passe-bas, d'ordre deux avec une fréquence de coupure de 7.5 Hz.

2. 4. 1. Sessions d'exposition

Dans le but de vérifier que notre manipulation de l'amplitude a bien influencé la synchronisation, nous avons calculé un index de synchronisation basé sur la protophase (DAMOCO toolbox sur Matlab, voir Kralemann et al., 2008). Plus cet index est proche de 1 et meilleure est la synchronisation (cf. Chapitre 2. 2. 1. 3.). Nous avons ensuite moyenné ces valeurs entre tous les essais d'une session d'exposition et utilisé une ANOVA à deux facteurs de groupes : Synchronisation (Similaire et Dissimilaire) et Créativité (Simple et Riche).

Une inspection visuelle des données, à l'aide des scalogrammes fournies par la transformée en ondelettes des signaux (cf. Chapitre 2. 1. 1.), a été effectuée pour s'assurer de notre manipulation de la créativité.

2. 4. 2. Sessions de tests : jeu en miroir

Les compétences d'improvisation ont été mesurées par les capacités des sujets à se coordonner et à créer des mouvements créatifs, c'est-à-dire riches, variés et complexes. Comme nous l'avons expliqué dans le Chapitre 2, le calcul de la phase relative n'était pas pertinent pour mesurer la coordination entre deux signaux de ce type, étant donné leur caractère non-stationnaire et la présence de plusieurs fréquences et amplitudes. Par conséquent, nous avons utilisé la procédure développée par Noy et collaborateurs (2011).

Ainsi, nous avons premièrement dérivé les signaux de position afin d'obtenir les signaux de vitesse de chaque essai. Une segmentation de ces signaux, basée sur les moments où la vitesse est nulle, c'est-à-dire aux points de rebroussement de la position, a ensuite été effectuée. La segmentation a permis de découper le signal en sous-mouvements. Chaque sous-mouvement durait au minimum 300 millisecondes et contenait un déplacement d'au moins 3 centimètres. Les segments d'un participant ont ensuite été appariés avec les segments correspondants de l'autre participant. Les segments appariés étaient considérés comme valides lorsque le début et la fin des deux segments ne différaient pas de plus de 400 millisecondes (Noy et al., 2011). Au final, la segmentation a permis de recouvrir et d'utiliser 79% de l'ensemble de nos données.

Quatre variables différentes ont été calculées à partir de la segmentation et une cinquième variable a été mesurée sur l'ensemble des signaux. Dans le but de mesurer la synchronisation entre les participants, nous avons mesuré un délai temporel (dT) moyen entre les signaux (cf. Chapitre 2. 2. 2. 3.). Ce délai temporel, exprimé en millisecondes, permet de mesurer la différence temporelle moyenne entre les deux signaux pour chaque segment, c'est-à-dire pour chaque sous-mouvement réalisé. Plus cette valeur est proche de 0 et meilleure est la synchronisation.

Afin de mesurer la créativité et la richesse motrice, deux autres variables ont été calculées. Nous avons premièrement calculé un index de complexité ($IndC$) basé sur la reconstruction du signal à l'aide de la transformée en ondelettes, détaillée dans le Chapitre 2. 1. 2. La vitesse maximale – V_{max} – a également été mesurée en moyennant les dix plus hautes valeurs de vitesse maximale obtenues pour chaque essai. Plus les valeurs de ces variables sont hautes et plus le mouvement produit est complexe et créatif (Chapitre 2. 1. 3.).

Finalement, deux autres variables ont été calculées. Elles rendent compte de l'expertise et du rôle dans l'interaction. Appelée « *co-confident motion* », la première variable témoigne de l'expertise telle qu'observée par Noy et al. (2011). Elle est définie comme la quantité de mouvements pour lesquels les participants créent des mouvements ensemble sans qu'il n'y ait de suiveur. Cette variable représente les moments de parfaite synchronisation (Nachmanovitch, 1990; Seham, 2001). Nous avons d'abord sélectionné les périodes de mouvements (i.e., vitesse différente de 0) durant plus de deux secondes. Dans ces périodes choisies, nous avons calculé la puissance spectrale quadratique moyenne (i.e., « *Fourier root-mean-square power* »), de la différence entre les vitesses des deux participants dans une bande de fréquence de 2-3 Hz. Si cette valeur était inférieure à 10% de la vitesse moyenne des sujets, alors nous comptabilisons ces périodes. Le « *co-confident motion* » correspond au ratio entre ces périodes retenues et la durée totale de mouvements. Plus cette valeur est importante et plus il y a de moments de parfaite synchronisation entre les participants.

La dernière variable – appelée « *jitter* » – est, quant à elle, un marqueur du rôle du suiveur. Elle correspond au composant haute fréquence contenu dans le mouvement. Cette mesure est calculée par la puissance spectrale moyenne quadratique dans la bande de fréquence de mouvement de 2-3Hz. Ce phénomène aurait pour origine le contrôle réactif relatif au rôle du suiveur afin d'ajuster ses mouvements à ceux du meneur (Noy et al., 2011). Plus la valeur est haute et plus le composant haute fréquence est présent.

Pour chaque paire et dans chaque session de test, les essais MS ont été moyennés, tout comme les essais IJ (Noy et al., 2011). Les quatre premières variables ont ensuite été soumises à une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs de groupes avec Synchronisation (Similaire et Dissimilaire) et Créativité (Simple et Riche) et deux facteurs de mesures répétées Session (Pré-test and Post-test) et Condition (MS et IJ). Les résultats de la session de test intermédiaire n'ont pas été reportés et ne présentaient aucune différence majeure avec les résultats obtenus entre les sessions Pré-test et Post-test. Nous avons ainsi uniquement analysé les capacités d'improvisation en début et en fin de protocole (respectivement, étapes 1 et 5). Finalement, nous nous attendons à des effets d'interaction impliquant nos facteurs de groupes (Synchronisation et Créativité) afin de démontrer que nos manipulations expérimentales ont un effet direct sur la performance d'improvisation. Concernant la variable *jitter*, une ANOVA à mesures

répétées un facteur Condition (Meneur, Suiveur ou Improvisation Jointe) sur la session Pré-test, puis sur la session Post-test a été réalisée, afin de contrôler la présence de la signature motrice dans les deux sessions de tests.

Pour toutes les analyses (sessions d'exposition et sessions de test), des analyses post-hoc Newman-Keuls ont été réalisées si nécessaire. La taille des effets obtenus avec les ANOVAs a été calculée à l'aide de l'éta carré partiel η_p^2 (Bakeman, 2005) et interprétée d'après Cohen (1988) : une valeur comprise entre 0.02 et 0.13 correspond à un petit effet ; une valeur comprise entre 0.13 et 0.26 correspond à un effet moyen et une valeur supérieure à 0.26 correspond à un grand effet.

3. Résultats

Dans cette section, nous avons préalablement vérifié que les participants aient bien suivi les instructions dans les sessions d'exposition. Nous nous sommes ensuite focalisés sur les sessions de test afin d'évaluer les performances d'improvisation des participants novices et leurs changements au cours de l'expérience.

3. 1. Sessions d'exposition

Premièrement, nous avons contrôlé si les participants avaient bien suivi les instructions sur la créativité des mouvements. Pour ce faire, nous avons utilisé les transformées en ondelettes (Chapitre 2. 1. 1.) et réalisé une inspection visuelle sur l'ensemble des données. Deux scalogrammes représentatifs des données sont illustrés sur la figure 21. La puissance du spectre est ici représentée par la couleur allant du noir au blanc : plus la couleur est claire et plus la puissance du spectre est importante, c'est-à-dire plus la fréquence est présente dans le signal. L'axe des abscisses exprime le temps en secondes alors que l'axe des ordonnées représente les fréquences en Hertz. Sur cette figure, nous pouvons observer la présence d'une seule fréquence autour de 0.5 Hz pour le groupe Simple (Figure 21. A.) alors que deux fréquences aux alentours de 0.25 et 4 Hz sont clairement distinctes pour le groupe Riche (Figure 21. B.)¹⁴. Le contrôle

¹⁴ Une simple transformée de Fourier suffit également pour observer la présence d'un pic de fréquence pour le groupe Simple et de deux pics pour le groupe Riche.

visuel de l'ensemble des séries temporelles, obtenues dans les sessions d'exposition, a confirmé le bon comportement des sujets et la validité de notre manipulation.

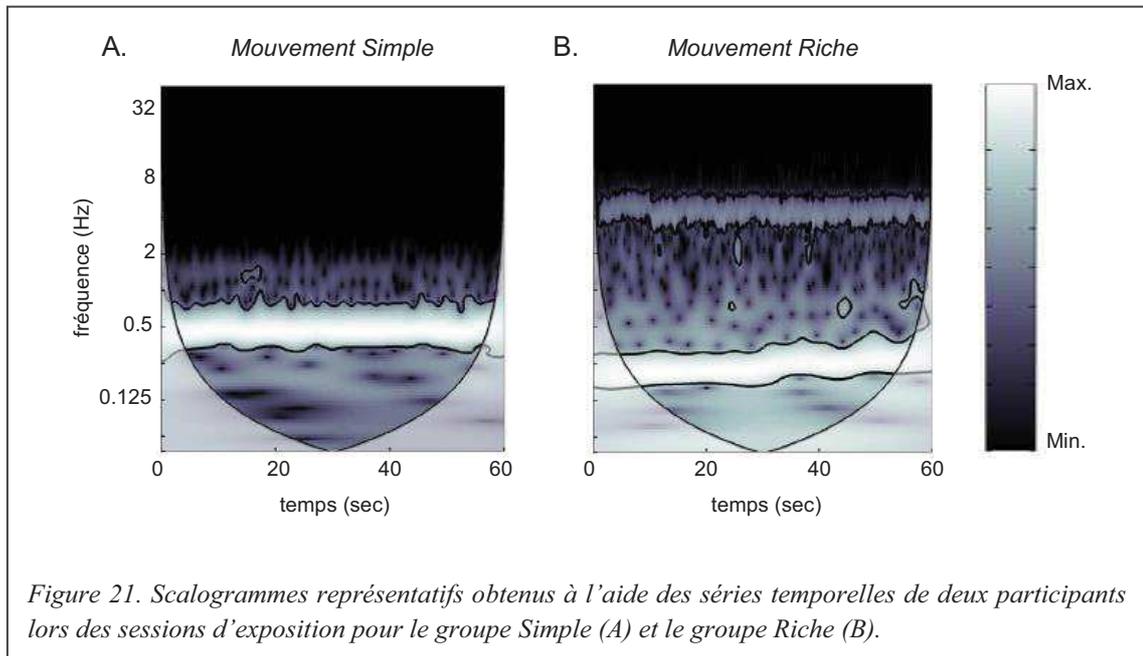


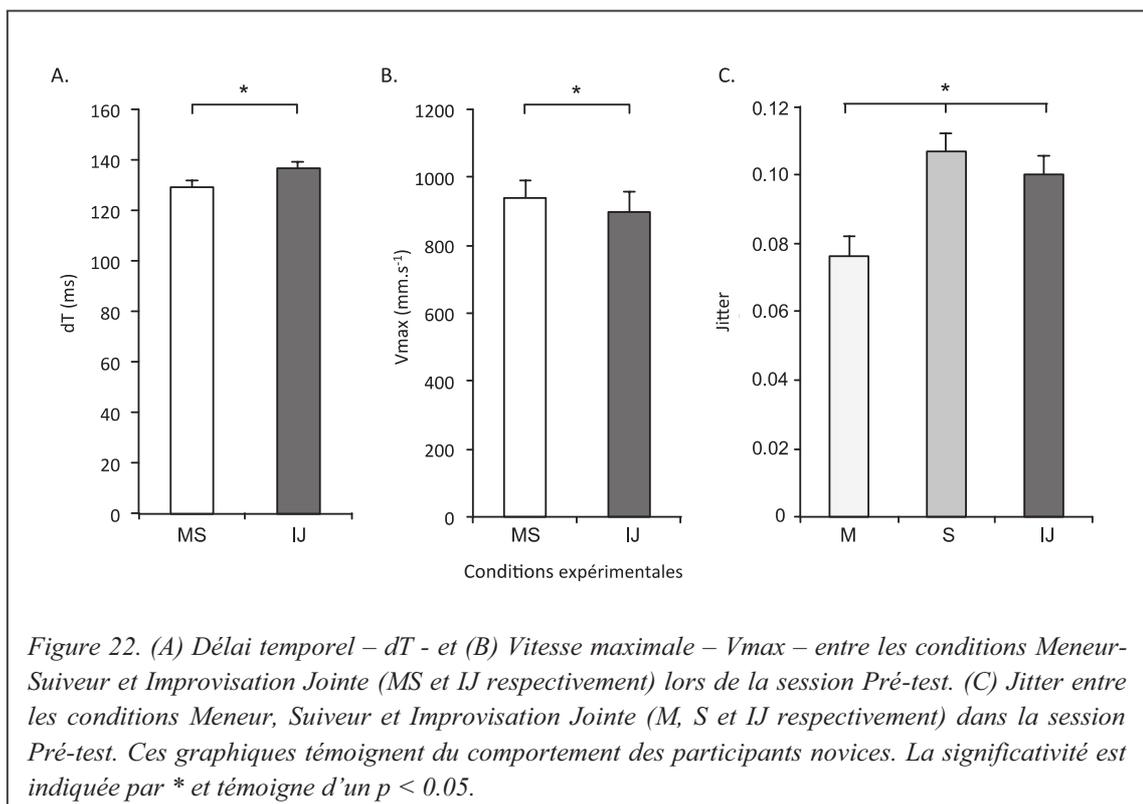
Figure 21. Scalogrammes représentatifs obtenus à l'aide des séries temporelles de deux participants lors des sessions d'exposition pour le groupe Simple (A) et le groupe Riche (B).

Secondement, nous avons vérifié que les instructions sur l'amplitude de mouvements avaient bien été respectées. La différence d'amplitude maximale entre les deux participants d'une paire a alors été calculée. Sans surprise, cette différence est significativement plus grande pour le groupe Dissimilaire que pour le groupe Similaire ($F(1,44) = 148.88, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.77$; $75.2 \text{ cm} \pm 24.3$ et $12.9 \text{ cm} \pm 8.4$ respectivement) confirmant ainsi nos manipulations. Nous avons ensuite calculé l'index de synchronisation. Les analyses statistiques ont alors révélé un effet simple du facteur de groupe Synchronisation ($F(1,44) = 68.12, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.61$) montrant que les participants du groupe Similaire (moyenne de 0,73) étaient plus synchronisés que ceux du groupe Dissimilaire (moyenne de 0,21). Pris ensemble, ces résultats confirment que (i) les participants ont bien suivi nos instructions portant sur l'amplitude, et (ii) que la différence d'amplitude de mouvements a bien influencé la coordination interpersonnelle, indépendamment de la créativité.

3. 2. Sessions de tests : jeu en miroir

3. 2. 1. Comportement novice

Avant d'analyser l'évolution des compétences d'improvisation, nous avons comparé le comportement novice de nos participants à celui obtenu par Noy et collaborateurs (2011) dans une tâche similaire. Pour faire cela, nous avons analysé, à l'aide d'un plus grand échantillon (96 vs. 12 participants), la première session de toutes les paires (session de Pré-test). Un *test-t de Student* a été utilisé afin de comparer les deux conditions d'improvisation (Meneur-Suiveur et Improvisation Jointe). Nos résultats ont montré que les participants novices produisaient des mouvements avec un dT meilleur (MS vs. IJ : $t(47) = -3.46, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.20$; Figure 22. A.) et une vitesse maximale, V_{max} , supérieure pour la condition MS que pour la condition IJ (MS vs. IJ : $t(47) = 2.61, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.13$, Figure 22. B.). Néanmoins, aucune différence n'a été observée pour le co-confident motion et pour l'index de complexité ($p > 0.05$). Enfin, l'ANOVA à mesures répétées avec un facteur Condition (Meneur, Suiveur ou Improvisation Jointe) a indiqué un effet Condition ($F(2,94) = 52.81, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.53$) témoignant que (i) le jitter était plus important dans la condition Suiveur que dans les autres conditions, et que (ii) le jitter dans la condition IJ était supérieur à celui de la condition Meneur (Figure 22. C.).

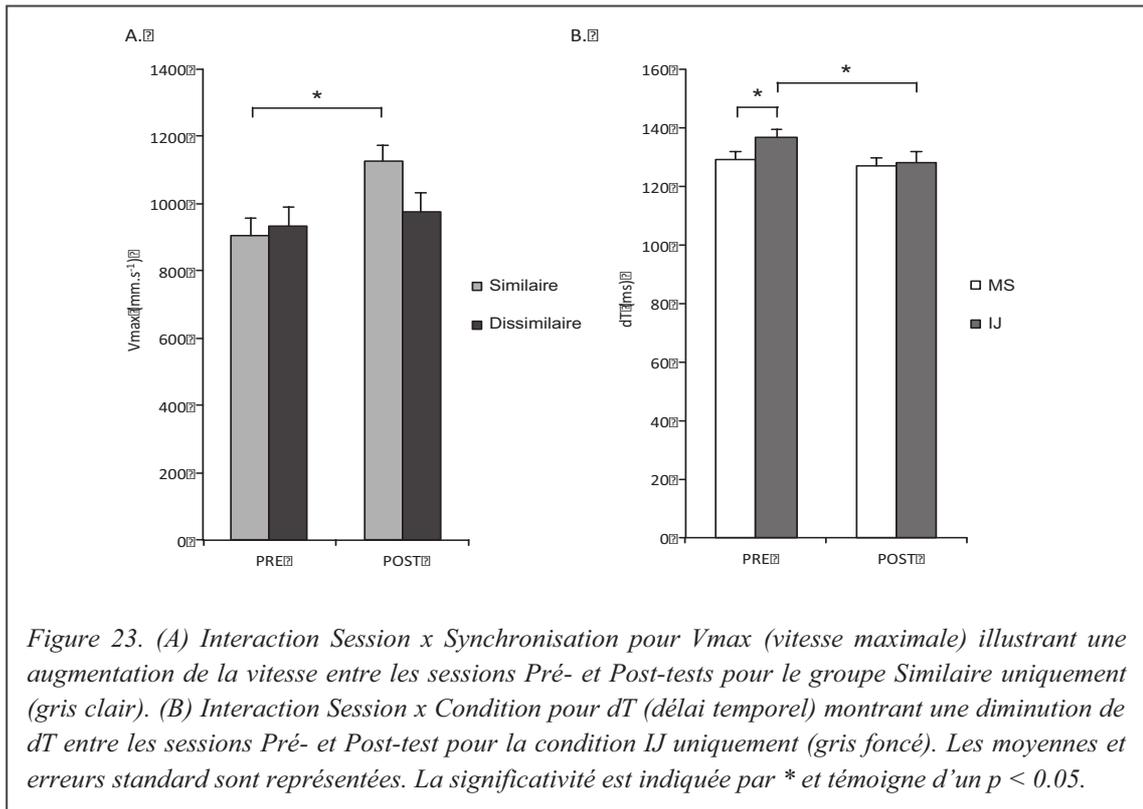


Nos résultats corroborent et étendent, à l'aide d'un échantillon plus grand, ceux obtenus par Noy et collaborateurs (2011) indiquant que le comportement novice est caractérisé par des capacités d'improvisation supérieures lorsque les rôles sont clairement définis (Meneur-Suiveur). En répliquant les données issues de la littérature, ces résultats valident notre paradigme expérimental, nous permettant ainsi d'investiguer l'évolution des capacités d'improvisation au cours du temps à partir de notre échantillon de 96 sujets.

3. 2. 2. Evolution des compétences d'improvisation au cours du temps

Concernant la créativité des mouvements, l'ANOVA à mesures répétées Session (Pré et Post-test) et Condition (MS et IJ) à deux facteurs de groupes Synchronisation (Similaire et Dissimilaire) et Créativité (Simple et Riche) réalisée sur Vmax a révélé un effet simple Session ($F(1,44) = 15.12, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.26$) et un effet simple Condition ($F(1,44) = 12.18, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.22$), indiquant (i) une augmentation de la vitesse maximale entre le Pré-test et le Post-test et (ii) une plus grande vitesse maximale dans la condition MS que IJ. Un effet d'interaction Session x Synchronisation a également été observé ($F(1,44) = 6.5, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.13$) montrant que la vitesse maximale a augmenté entre les deux sessions pour le groupe Similaire uniquement ($p < 0.05$; Figure 23. A.). La même ANOVA réalisée sur l'index de complexité (IndC) a également montré un effet simple Session ($F(1,44) = 18.28, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.29$) illustrant l'augmentation de la créativité entre les deux sessions. Une interaction Session x Synchronisation ($F(1,44) = 5.81, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.12$) a également été observée révélant l'augmentation de la créativité entre les deux sessions pour le groupe Similaire uniquement ($p < 0.05$).

Concernant la synchronisation des mouvements, l'analyse statistique de dT a révélé un effet simple Session ($F(1,44) = 5.18, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.11$), un effet simple Condition ($F(1,44) = 4.81, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.10$) et un effet d'interaction Session x Condition ($F(1,44) = 5.14, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.10$). L'analyse post-hoc de cette interaction a montré une diminution de dT seulement pour la condition IJ entre Pré- et Post-test. Elle a également indiqué que le dT dans la condition MS était plus petit que dans la condition IJ en Pré-test, mais que cette différence disparaissait en Post-test (Figure 23. B.). Aucun effet simple ou d'interaction impliquant les groupes n'a été observé.



Pour le « co-confident motion » (i.e., marqueur de l'expertise), une ANOVA similaire n'a révélé aucun effet significatif ($p > 0.05$). Cependant, une tendance de taille moyenne Session x Synchronisation a été observée suggérant que le co-confident motion n'augmente que pour le groupe Similaire ($F(1,44) = 3.52, p = 0.07, \eta_p^2 = 0.07$).

Pour finir, l'ANOVA à mesures répétées Condition (MS et IJ) à 2 facteurs de groupes Synchronisation (Similaire et Dissimilaire) et Créativité (Simple et Riche) du jitter (i.e., marqueur du suiveur), pour la session Post-test uniquement, a révélé un effet simple Condition ($F(2,88) = 28.56, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.39$). A l'instar de l'effet observé en Pré-test dans la section précédente, cet effet a montré que (i) le jitter était plus important dans la condition Suiveur que dans les autres conditions, et que (ii) le jitter dans la condition IJ était supérieur à celui de la condition Meneur. Ce résultat n'indique ainsi aucune évolution de cette variable au cours de l'expérience.

4. Discussion

Nos résultats confirment, tout d'abord, que le comportement novice est caractérisé par une meilleure performance d'improvisation lorsque les rôles sont

clairement prédéfinis (Meneur-Suiveur) que lorsque les rôles émergent de l'interaction (Improvisation Jointe). Plus précisément, les novices (i.e., participants en Pré-test) ont une meilleure synchronisation et créativité motrice dans la condition Meneur-Suiveur (MS). Chaque individu connaît ici son rôle et sait ce qu'il doit faire : à savoir mener ou suivre l'interaction. La synchronisation est alors plus facile à obtenir. En effet, il a notamment été montré que les meneurs produisaient des mouvements communicatifs en invitant le second participant à le suivre (Sacheli, Tidoni, Pavone, Aglioti, & Candidi, 2013), favorisant ainsi la coordination interpersonnelle. A l'inverse, la condition Improvisation Jointe (IJ) engendre un échange de rôle, créant une incertitude et de possibles incompréhensions entre les deux participants. Les participants ne se connaissaient pas avant l'expérience. Cela a pu mener à une communication non-verbale entre eux plus difficile à décrypter, pouvant, notamment, induire des incompréhensions et des difficultés de synchronisation entre leurs mouvements dans la condition IJ. Nous faisons l'hypothèse que face à ces incompréhensions, les participants ont focalisé leur attention sur les échanges de rôles au détriment de la créativité motrice, menant alors à des mouvements plus pauvres et plus lents.

Par rapport à notre objectif initial – i.e., l'acquisition des compétences d'improvisation – nos résultats révèlent que le comportement novice change et évolue au cours du temps. Les capacités d'improvisation peuvent ainsi être améliorées aussi bien au niveau de la coordination que de la créativité motrice. De manière intéressante, nos résultats montrent que le comportement novice semble progressivement tendre vers celui des experts observé par Noy et collaborateurs (2011).

Concernant la coordination, elle est uniquement améliorée dans la condition IJ, faisant disparaître la différence entre les conditions en Post-test (Figure 23. B.). Pour quelles raisons observe-t-on une amélioration de la coordination dans la condition IJ mais pas dans la condition MS ? Une hypothèse explicative peut se trouver dans la directionnalité du couplage impliquée dans les conditions MS et IJ. Dans un système d'oscillateurs couplés, la directionnalité du couplage correspond à l'influence d'un oscillateur sur l'autre, modifiant la coordination (Schmidt & Richardson, 2008). La condition IJ rend compte d'un couplage quasi-bidirectionnel, puisque les deux participants sont, à la fois, meneur et suiveur. Le couplage bidirectionnel maximise les échanges d'informations favorisant la coordination entre les oscillateurs (de Rugy et al., 2006; Okazaki et al., 2015). Nous pensons ainsi que le couplage bidirectionnel a permis

d'améliorer les échanges d'informations entre les deux participants, permettant une amélioration de la coordination dans la condition IJ. Les sujets ont également pu apprendre à décrypter la communication non-verbale de leur binôme. Cette meilleure compréhension de l'autre a pu diminuer les moments d'incompréhension favorisant la coordination entre les individus. A contrario, bien que les deux sujets soient influencés par l'autre dans la condition MS, le couplage est quasi-unidirectionnel car très fortement asymétrique (le suiveur étant plus influencé par le meneur que l'inverse). Ce type de couplage implique un échange d'informations ne favorisant pas la coordination. Ainsi, la coordination n'a pu être améliorée. De plus, la performance dans cette condition est principalement limitée par la réactivité du suiveur (Bastian, 2006), illustrée par la présence d'un effet seuil (Noy et al., 2011). Néanmoins, il est important de noter que l'amélioration de la coordination ne semble pas être influencée par les phases d'exposition. Nous observons, en effet, une amélioration de la coordination quelle que soit l'exposition réalisée. Cette amélioration peut notamment s'expliquer par l'effet de la pratique répétée du jeu en miroir (Schmidt & Lee, 1988) : plus les individus réalisent cette situation d'improvisation et plus ils sont coordonnés. Une intéressante tendance au niveau du marqueur de l'expertise (i.e., « co-confident motion ») tend toutefois à suggérer que la synchronisation réalisée durant les phases d'exposition pourrait augmenter les moments de parfaite synchronisation entre les participants dans le jeu en miroir, sans pour autant se limiter à la condition IJ.

A l'inverse, la créativité motrice semble être impactée par les phases d'exposition réalisée par les participants entre les sessions de jeu en miroir. Nos résultats indiquent une amélioration de la créativité motrice pour les paires du groupe Similaire, contrairement aux paires du groupe Dissimilaire. En d'autres termes, une relation fonctionnelle entre la quantité de synchronisation non-intentionnelle et la créativité motrice dans les sessions d'improvisation serait observée. Valdesolo, Ouyang, & DeSteno (2010) ont, par exemple, montré que deux participants produisaient une tâche jointe plus rapidement s'ils avaient réalisé au préalable une tâche de synchronisation non-intentionnelle. Ils ont ainsi suggéré que la synchronisation influençait le comportement intrinsèque des sujets, et leur sensibilité perceptive aux mouvements de l'autre. Plus généralement, la synchronisation permettrait d'augmenter la coopération entre les participants, mais aussi la cohésion de groupe (McNeill, 1997; Repp & Su, 2013; Wiltermuth & Heath, 2009). L'effet « persistant » de la

synchronisation non-intentionnelle sur le comportement a quelquefois été désigné comme la *mémoire sociale* (Insel & Fernald, 2004; Oullier et al., 2008). Dans cette dernière étude, les auteurs ont montré que les mouvements produits par deux participants, après une tâche de synchronisation non-intentionnelle, présentaient plus de fréquences communes qu'avant la tâche de synchronisation. Ces résultats suggèrent ainsi que la synchronisation non-intentionnelle peut positivement impacter le comportement moteur, tout en favorisant les liens sociaux et les comportements altruistes dans les interactions sociales (e.g., Marsh, Richardson, & Schmidt, 2009; Valdesolo & DeSteno, 2011).

Ainsi, ce chapitre a permis de mettre en exergue l'acquisition des capacités d'improvisation, évaluées à travers la créativité et la coordination, en l'absence d'une expertise préalable en improvisation. La manipulation de ces deux paramètres, dans des phases d'exposition, a permis de montrer que (i) la synchronisation contribuait majoritairement à améliorer ces capacités, et d'autant plus la créativité ; et (ii) qu'elle pouvait prédire la capacité de créativité dans une situation d'improvisation telle que le jeu en miroir. Contrairement à la coordination, la créativité est, en effet, améliorée par la présence de la synchronisation dans les phases d'exposition. Cela suggère que les experts en activités d'improvisation artistique produisent et improvisent des mouvements plus créatifs et plus coordonnés car ils possèdent une plus forte capacité de synchronisation. Pris ensemble, ces résultats rendent compte de l'impact d'une situation d'improvisation socio-motrice sur le comportement moteur entre deux personnes. Dans le chapitre suivant, nous explorerons l'effet d'une telle situation sur le comportement moteur individuel. Plus précisément, nous nous intéresserons à l'influence de la créativité et de la coordination interpersonnelle sur le système postural de chaque individu, afin d'observer l'effet de ces différentes contraintes sur la dynamique de coordination posturale.

Résumé

L'objectif de ce chapitre était d'explorer les capacités d'improvisation de novices. Nous avons aussi investigué les mécanismes sous-tendant leur acquisition.

Nos résultats confirment que les sujets novices ont une meilleure performance d'improvisation lorsque les rôles sont prédéfinis (condition Meneur-Suiveur) que lorsque les rôles émergent de l'interaction. Ils indiquent également de manière quantitative que les capacités d'improvisation peuvent être améliorées.

Spécifiquement, la coordination s'améliore principalement par la pratique, pour la condition Improvisation Jointe favorisée par un couplage quasi-bidirectionnel, et ce quelle que soit la phase d'exposition. A l'inverse, la créativité semble être améliorée par la synchronisation non-intentionnelle produite dans des phases d'exposition. Ainsi, apprendre à improviser pourrait d'abord nécessiter l'émergence de capacités de synchronisation conduisant à l'amélioration de la créativité.

Chapitre 4

Improvisation socio-motrice & Posture

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Coste, A., Zhao, Z., Bardy, B. G., & Marin, L. (2016). Postural coordination during socio-motor improvisation. *Frontiers in Psychology, 7*, 1168.

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Bardy, B. G., Zhao, Z., Schmidt R. C., & Marin, L. (2015). Spontaneous dynamic of intrapersonal postural coordination. *Studies in Perception & Action XIII - 18th International Conference on Perception and Action* (p. 53-56). *Weast-Knapp, Malone & Abney Eds.* 14-18 Juillet. Minneapolis, MN, USA. Article conférence.

Gueugnon, M., Salesse, R. N., Coste, A., Schmidt, R. C., Zhao, Z., Bardy, B. G., & Marin, L. (2014). Effet de la coordination motrice interpersonnelle sur les coordinations intra- et supra-posturales. *10th « Journée de l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain »*. 6 Juin. Montpellier, France. Communication affichée.

1. Introduction

Le troisième objectif de cette thèse est d'investiguer l'influence de l'improvisation socio-motrice sur la coordination intra-personnelle. Plus précisément, nous souhaitons explorer l'effet de la coordination et de la créativité des mouvements lors d'une tâche d'improvisation socio-motrice sur la posture de chaque individu impliqué. La posture sous-tend, supporte les actions et les comportements de chacun, tout en étant réciproquement influencée par ces mêmes actions. Durant ces situations d'interaction, chaque individu est soumis à différentes contraintes, comme ses propres mouvements, les mouvements d'autrui et la synchronisation entre ces mouvements. Ces différentes contraintes impliquent une délicate coordination entre les parties supérieures et inférieures du corps de chaque individu. Cette coordination intra-personnelle rend compte de certains ajustements posturaux permettant le maintien de l'équilibre et la production des mouvements durant l'interaction (Bardy, 2004; Lee, 1989; Stoffregen & Riccio, 1988). Même si le maintien de l'équilibre n'est pas le but de l'interaction, la coordination spécifiant la stabilité posturale est, malgré tout, sollicitée et influencée par ces contraintes environnantes (Stoffregen & Riccio, 1988).

Au sein de l'approche dynamique dans laquelle nous nous retrouvons, la posture a souvent été observée au travers de la coordination hanche-cheville (Bardy et al., 1999, 2002). Ces études princeps ont, entre autres, montré l'émergence de patrons stables en phase et en antiphase, correspondant respectivement à une flexion/extension des articulations hanche et cheville dans la même direction ou dans des directions opposées. La stabilité de la coordination posturale¹⁵ serait influencée par certains paramètres du mouvement, comme la fréquence et l'amplitude (Bardy et al., 1999; Marin et al., 1999). Abe and Yamada (2001) ont, eux, observé que l'augmentation de la fréquence des mouvements des bras impactait la stabilité posturale. La complexité de la coordination entre les mains tendrait également à perturber la posture (Forner-Cordero, Levin, Li, & Swinnen, 2007). Dans le contexte de l'improvisation socio-motrice où les participants produisent différents mouvements, ces résultats sont intéressants puisqu'ils évoquent une influence des mouvements, et en particulier ceux des bras, sur la posture. Cela suggère ainsi que la fréquence, la complexité et le type de mouvements réalisés, et

¹⁵ Une perte de stabilité peut être observée par une transition d'un patron à un autre, ou par la diminution de la stabilité du patron stable émergent.

potentiellement la créativité motrice, peuvent impacter la dynamique de coordination posturale.

D'autres auteurs se sont intéressés à l'influence de la coordination interpersonnelle sur la posture. C'est le cas, par exemple, de Varlet et collaborateurs (2011). A l'aide d'une tâche de poursuite de cible avec la tête entre deux individus, ces auteurs ont montré un effet de la coordination interpersonnelle sur la stabilité posturale, illustré par un rapprochement des transitions d'un patron vers un autre entre les deux individus. Néanmoins, ces résultats ne permettent pas de savoir s'il s'agit d'un effet bénéfique ou délétère sur la posture. Ramenzoni et collègues (2011, 2012) ont, par ailleurs, observé un effet de la coordination interpersonnelle sur le comportement postural de chaque individu. Dans une tâche fine de pointage à deux dans laquelle un participant tient un pointeur et un second la cible, ces auteurs ont observé que la réalisation de cette tâche à deux modulait la manière dont les individus coordonnaient leurs propres mouvements du tronc et de la main. De la même manière, Varlet et collaborateurs (2014) ont montré que regarder une personne en station debout immobile tend à stabiliser les déplacements du centre de pression des individus et ainsi améliorer leur stabilité posturale. L'ensemble de ces études suggère ainsi un effet bénéfique des coordinations interpersonnelles sur la posture de chaque individu. Ainsi, réaliser une tâche d'interaction semble être associé à une amélioration de la stabilité posturale des protagonistes de l'interaction.

Le but de ce chapitre est d'investiguer l'organisation posturale sous-tendant les interactions sociales à l'aide d'une tâche d'improvisation socio-motrice. Plus précisément, nous voulons explorer dans quelle mesure la dynamique de coordination posturale est altérée et contrainte par la créativité motrice et la coordination interpersonnelle. Afin de distinguer ces deux effets, nous avons premièrement manipulé la créativité des mouvements en termes d'amplitude et de complexité, et ce, sans la présence de coordination interpersonnelle. Nous nous attendons à observer un effet délétère de l'amplitude et de la complexité sur la posture. Nous pensons que la production de mouvements complexes et de grande amplitude perturbera la stabilité de la coordination posturale. Une fois l'effet de la créativité sur la posture observé, nous avons ensuite exploré l'impact de la coordination interpersonnelle sur la coordination posturale dans une situation d'improvisation (i.e., jeu en miroir). Afin de manipuler la coordination interpersonnelle (et donc son influence), nous avons ici utilisé la condition Meneur-Suiveur. Dans cette condition, bien que chaque participant soit influencé par

son binôme, le couplage est (très) asymétrique puisque le suiveur doit reproduire et imiter les mouvements du meneur. Nous pensons ainsi observer un effet positif de la coordination interpersonnelle sur la stabilité posturale mais également un effet plus important pour le suiveur que pour le meneur. Afin de rendre compte de l'ensemble des contraintes de l'improvisation sur la posture, nous avons analysé la coordination posturale dans les directions instruite et non-instruite par la tâche (i.e., respectivement médio-latérale ML, et antéro-postérieure AP). Nous nous attendons ainsi à observer des effets plus prononcés de la créativité et de la coordination sur la posture dans la direction ML.

2. Méthode

2.1. Participants

Nous avons, dans ce travail, utilisé une partie de l'expérience réalisée dans le chapitre précédent. Initialement, 96 volontaires sains, répartis aléatoirement en 48 paires, ont réalisé l'entière expérience (voir Chapitre 3). Dans ce chapitre, nous avons seulement analysé une situation dans laquelle chaque participant produisait, seul, un mouvement demandé (i.e., situation Solo) et une situation dans laquelle chaque paire réalisait une tâche d'improvisation (i.e., situation Duo).

Sur ces 48 paires, 42 ont été incluses dans la situation Solo (20 paires homme-homme et 22 paires femme-femme d'âge moyen de 20.2 ans \pm 2.6, de taille moyenne de 1.71 m \pm 0.11 et d'un poids moyen de 63.6 kg \pm 13.9). Sur ces 42 paires restantes, seulement 27 paires ont pu être analysées dans la situation Duo (dont 10 paires homme-homme ; âge moyen de 20.1 ans \pm 2.1, taille moyenne de 1.68 m \pm 0.10 et poids moyen de 59.4 kg \pm 10.5)¹⁶. Tous les participants avaient une vue normale ou légèrement corrigée et étaient droitiers d'après le test de préférence manuelle d'Edinburgh (« *Edinburgh Handedness Inventory* »). Tous ont signé un consentement respectant les règles de l'Université de Montpellier. L'entière expérience était conforme à la Déclaration d'Helsinki.

¹⁶ Plusieurs paires ont dû être exclues de l'analyse pour des raisons techniques (voir Chapitre 4. 2. 4. *Traitement des données*)

2. 2. Set-up expérimental

Les participants se tenaient debout l'un en face de l'autre, à une distance de 1 mètre. Une fois en place, il leur était demandé de tenir un stick avec leur main droite. Ce stick, placé à une distance de 45 cm d'eux, était attaché à un fil d'une longueur de 1.80 m. Le fil était positionné horizontalement à hauteur d'épaules. Huit caméras infrarouges (Nexus MX13 Vicon System ©) étaient placées autour du set-up expérimental dans le but d'enregistrer la position de douze marqueurs passifs : un en haut de chaque stick pour enregistrer le déplacement du end-effecteur et cinq sur le côté droit de chaque individu afin de capturer les déplacements posturaux de chacun (Figure 24.). Ces cinq marqueurs, localisés sur l'épaule (acromion), la hanche (grand trochanter), le genou (centre articulaire estimé), la cheville (malléole externe) et l'hallux (tête du premier métatarse), ont permis de calculer les positions angulaires des hanches et des chevilles de chaque individu (Varlet et al., 2011).

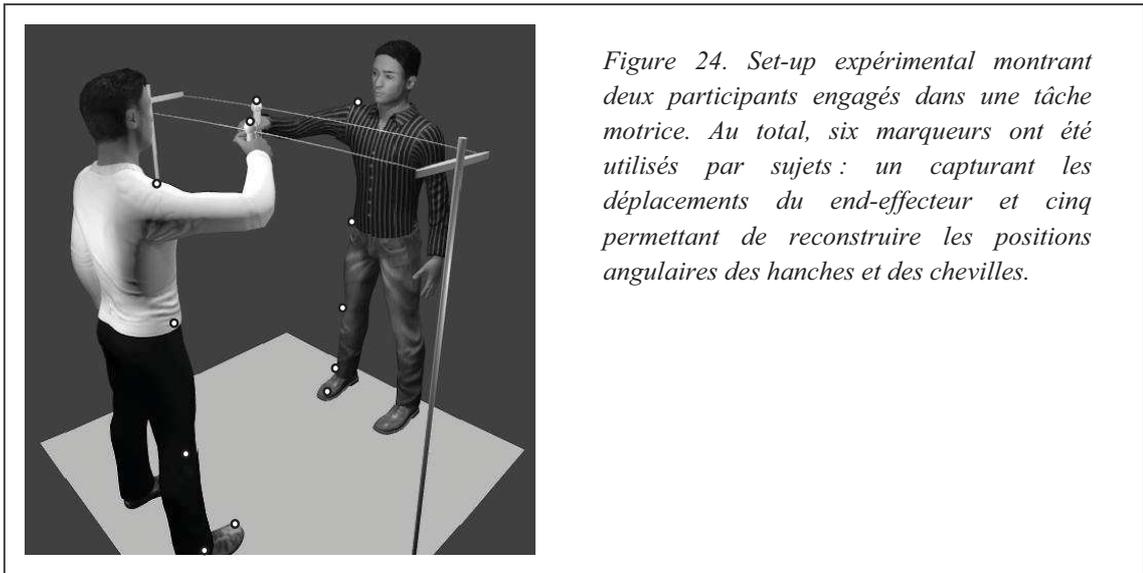


Figure 24. Set-up expérimental montrant deux participants engagés dans une tâche motrice. Au total, six marqueurs ont été utilisés par sujets : un capturant les déplacements du end-effecteur et cinq permettant de reconstruire les positions angulaires des hanches et des chevilles.

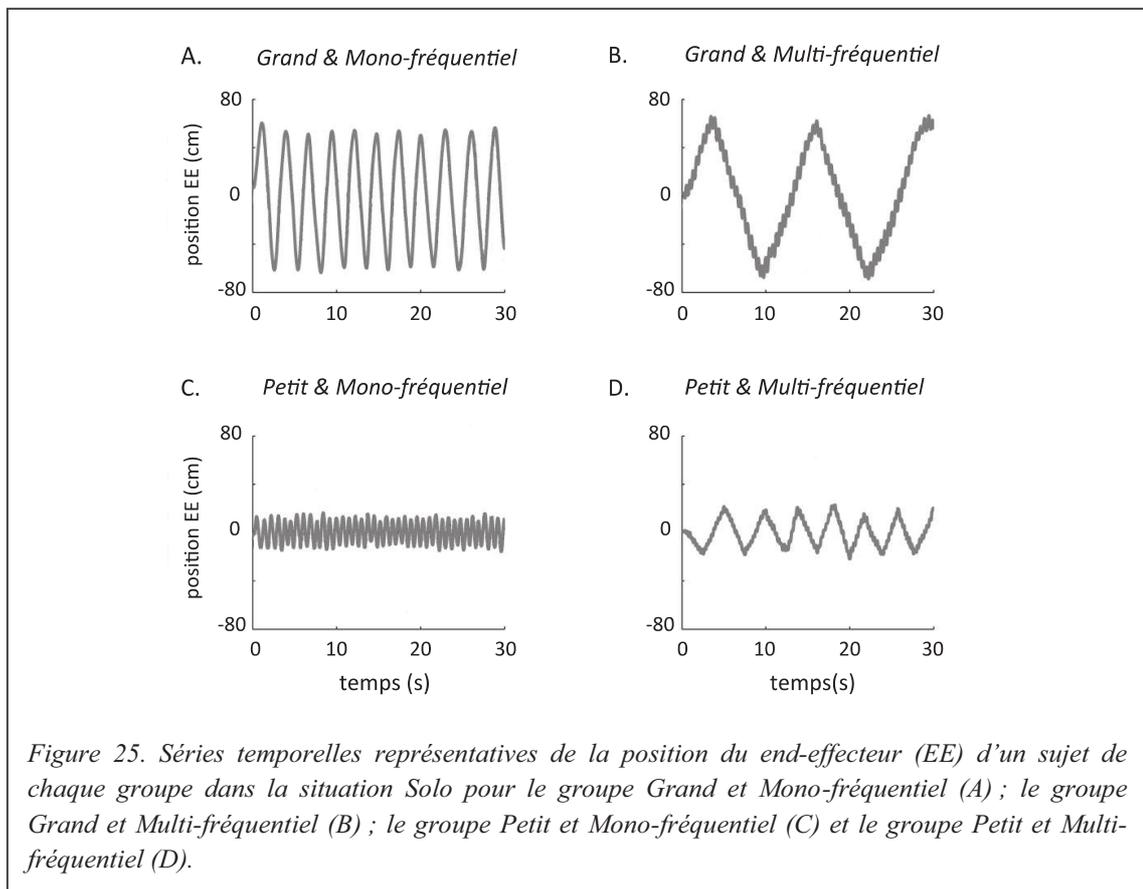
2. 3. Procédure expérimentale

Les participants ont réalisé deux types de tâches. Afin d'évaluer l'effet de la créativité du mouvement du end-effecteur indépendamment de la coordination interpersonnelle, nous avons demandé à nos sujets de réaliser seuls une tâche motrice appelée *situation Solo*. Une fois l'effet de la créativité sur la posture connu, nous avons

demandé aux sujets de réaliser une tâche d'improvisation socio-motrice afin de mesurer l'effet de la coordination interpersonnelle durant l'improvisation (*situation Duo*).

2. 3. 1. Situation Solo

Pour la situation Solo, les participants étaient aléatoirement séparés en quatre groupes afin de manipuler la créativité des mouvements en termes de complexité et d'amplitude. Un plan expérimental deux-par-deux a été utilisé. La complexité des mouvements a été manipulée en demandant aux participants de déplacer le stick en produisant soit une simple oscillation à leur fréquence préférentielle (i.e., Groupe Mono-fréquentiel avec $N = 42$ individus) ou une double oscillation (i.e., Groupe Multi-fréquentiel avec $N = 42$ individus). Les participants de ce dernier groupe devaient produire une double oscillation, en ajoutant une oscillation à haute fréquence sur leur oscillation naturelle. L'amplitude du mouvement a également été manipulée en instruisant les participants de produire ces mouvements sur une amplitude inférieure à leur largeur d'épaules (i.e., Groupe Petit avec $N = 23$ individus) ou supérieure à leur largeur d'épaules (i.e., Groupe Grand avec $N = 61$ individus). L'expérimentateur donnait premièrement les instructions, puis montrait rapidement le mouvement que chaque individu devait réaliser. Chaque participant devait réaliser, seul, un essai de 30 secondes pendant que l'autre participant restait immobile. La figure 25 résume l'ensemble des mouvements demandés dans chaque groupe.



2. 3. 2. Situation Duo

Dans cette situation, l'ensemble des 27 paires de participants a réalisé la tâche d'improvisation. Comme indiqué précédemment, les paires ont réalisé le jeu en miroir dans lequel ils devaient « créer des mouvements complexes, variés et intéressants tout en restant le plus coordonnés possible » en déplaçant le stick qu'ils tenaient le long du fil. Seule la condition Meneur-Suiveur a été retenue ici afin de manipuler la coordination interpersonnelle. Le participant désigné comme meneur, menait l'interaction et improvisait tandis que le second devait suivre les mouvements du meneur. Chaque participant a aléatoirement réalisé un essai de 45 secondes en tant que Meneur et un essai de 45 secondes en tant que Suiveur.

2. 4. Traitement des données

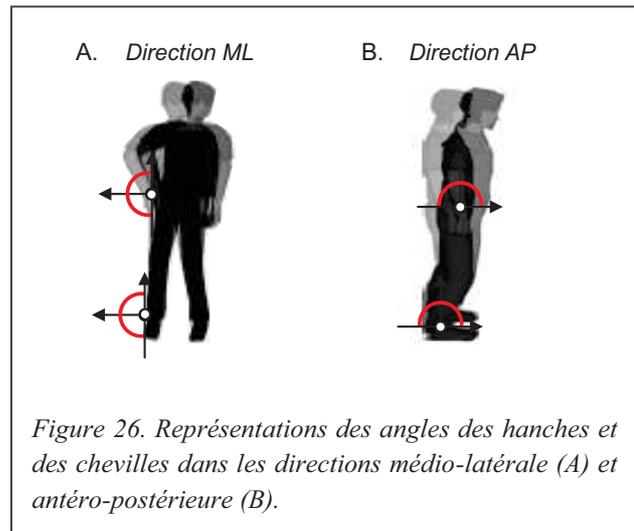
Les déplacements des douze marqueurs ont été extraits, recentrés autour de zéro et filtrés à l'aide d'un filtre passe-bas de 7,5 Hz. L'extraction des données a quelques fois été perturbée par la disparition de plusieurs marqueurs, occasionnellement masqués (phénomène relativement fréquent en posture). 5% de la totalité des données était manquante. Dans le but de maintenir une seule et même procédure pour l'ensemble de sujets, nous avons pris uniquement en compte les paires pour lesquelles la totalité des douze marqueurs était visible.

2. 4. 1. End-effecteur

Afin de prendre en compte la créativité des mouvements réalisés par chaque individu, nous avons mesuré l'amplitude maximale des mouvements du end-effecteur (i.e., stick) réalisés par chaque individu (Chapitre 2. 1. 3.). De plus, nous avons évalué la complexité des mouvements réalisés. Pour cela, nous avons mesuré le pourcentage du spectre significatif (nommée PSS), à l'aide de la transformée en ondelettes des signaux (Chapitre 2. 1. 1.). La fenêtre de fréquences choisies, recouvrant l'ensemble des signaux, était de 0.25 à 5 Hz. Le PSS représente la quantité de fréquence significativement présente dans cette fenêtre de fréquences pour chaque signal. Plus cette valeur est proche de 1, plus le signal contient de fréquences dans la fenêtre sélectionné, et plus le signal est complexe (le spectre est ainsi plus large).

2. 4. 2. Posture

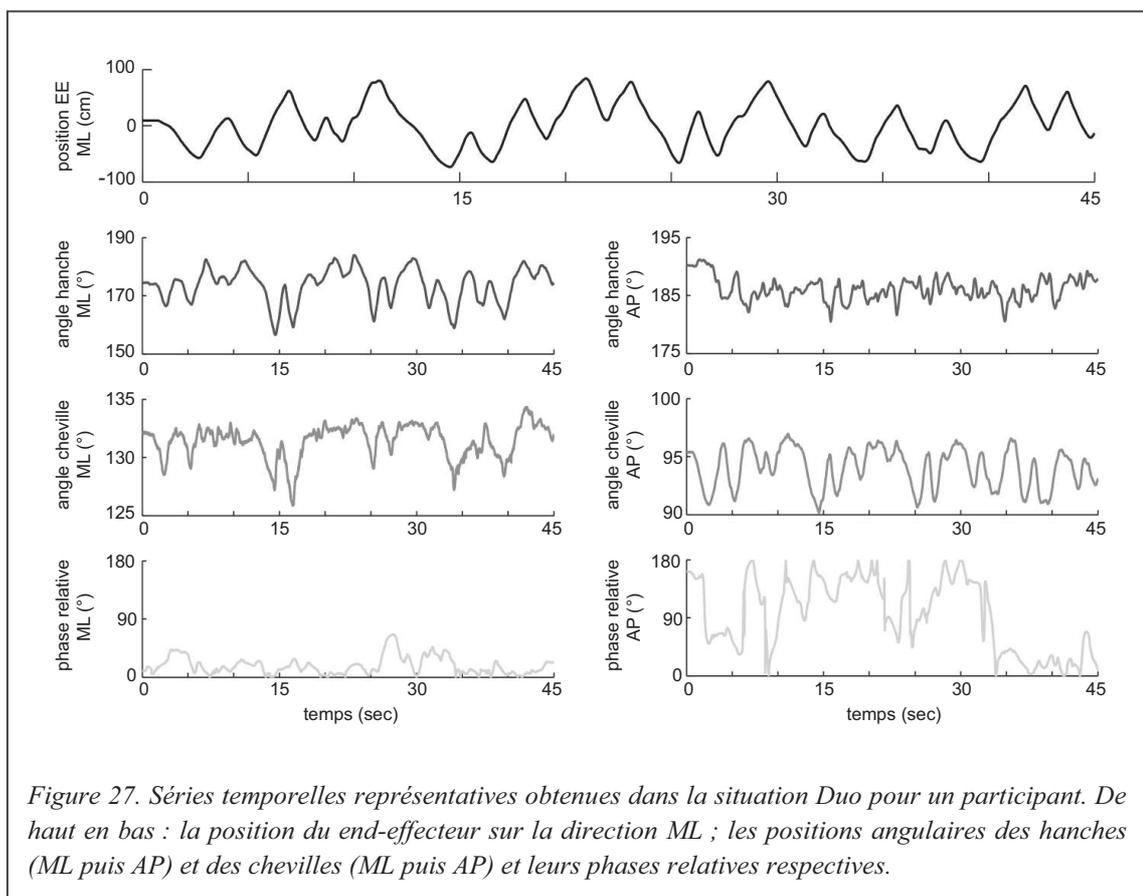
Les cinq marqueurs situés sur chaque participant nous ont permis d'évaluer la position angulaire des hanches et des chevilles dans les directions antéro-postérieures et médio-latérales (AP et ML respectivement ; Figure 26.). Basées sur ces angles, deux variables dépendantes ont été calculées. Nous avons premièrement mesuré la



cohérence spectrale croisée (CSC) au pic maximal de fréquence dominante des hanches et des chevilles (Chapitre 2. 2. 2. 2.). Cette variable quantifie la corrélation entre deux signaux au pic maximal de fréquence. Plus la corrélation est importante et plus le couplage entre les deux articulations est fort (Richardson et al., 2005; Schmidt et al., 2007). Une valeur de CSC proche de 1 indique que les deux signaux sont fortement corrélés à la même fréquence dominante alors qu'une valeur de CSC de 0 n'indique aucune fréquence dominante commune et donc une absence de coordination. Cette variable a d'ailleurs récemment été utilisée pour évaluer la coordination hanche-cheville (Sofianidis, Elliott, Wing, & Hatzitaki, 2015).

La phase relative entre les hanches et les chevilles a également été calculée afin d'évaluer la coordination dynamique entre ces deux articulations. Nous avons extrait la phase relative depuis la transformée en ondelettes croisées réalisée entre la position angulaire des hanches et celle des chevilles (cf. Chapitre 2. 2. 2. 2.). La phase relative a été extraite sur une bande de fréquences allant de 0.10 à 2 Hz, recouvrant l'ensemble de l'activité des séries temporelles. Afin d'obtenir une vision globale de la coordination, nous avons moyenné la phase relative contenue dans la bande de fréquences à chaque instant et obtenu une valeur de phase relative instantanée entre 0 et 180°. La coordination posturale étant ici spontanée, l'utilisation de la moyenne et de l'écart-type de la phase relative n'est pas appropriée pour rendre compte du patron de coordination utilisé et de sa stabilité. Dans le but d'obtenir ces deux informations, nous avons ainsi calculé la distribution de la phase relative (Richardson et al., 2007; Varlet et al., 2011). Au regard de la littérature, le pourcentage d'occurrence de phase relative de neuf

régions de 20° (de 0 à 180°) a ainsi été calculé. Dans notre étude, un patron en phase (ϕ_{h-c} proche de 0°) correspond à une flexion ou extension des hanches et chevilles dans la même direction. A l'inverse, un patron en antiphase (ϕ_{h-c} proche de 180°) réfère à une flexion ou extension dans des directions différentes. Le pourcentage de phase relative obtenu dans les régions stables (i.e., phase et antiphase) renseigne également sur la stabilité de la coordination. Plus cette valeur est importante et plus la stabilité est importante. La figure 27 illustre les déplacements du end-effecteur dans la direction ML, ainsi que les positions angulaires des hanches et des chevilles et de la phase relative dans les directions ML et AP, obtenus dans la situation Duo.



Dans le but d'explorer l'effet de la créativité des mouvements du end-effecteur indépendamment de la coordination interpersonnelle, nous avons premièrement analysé la situation Solo. Comme les groupes étaient de tailles différentes, nous avons opté pour des tests non-paramétriques tel que le Mann-Whitney pour comparer (i) les groupes Petit et Grand et (ii) les groupes Mono-fréquentiel et Multi-fréquentiel. Quand nécessaire, nous avons utilisé l'ANOVA de Friedman puis le test de Wilcoxon pour

distinguer ces différences. La taille des effets – notée r – a été reportée, lorsque cela était possible. Un petit effet correspondait à une valeur r comprise entre 0.1 et 0.3, un effet moyen à une valeur r comprise entre 0.3 et 0.5, enfin, un grand effet à une valeur r supérieure à 0.5 (Coolican, 2009).

Nous avons ensuite comparé les situations Solo et Duo afin d'explorer l'influence de la coordination interpersonnelle dans une tâche d'improvisation. Cette fois-ci, nous avons réalisé des ANOVAs à mesures répétées. Une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée aux données en cas de violation de la sphéricité. Des tests post-hoc Newman-Keuls ont été effectués, si nécessaire, afin de déterminer la nature des effets. La taille des effets obtenus avec les ANOVAs a été calculée à l'aide de l'éta carré partiel η_p^2 (Bakeman, 2005) et interprétée d'après Cohen (1988) où une valeur comprise entre 0.02 et 0.13 correspond à un petit effet ; une valeur comprise entre 0.13 et 0.26 correspond à un effet moyen et une valeur supérieure à 0.26 correspond à un grand effet.

3. Résultats

Dans cette section, nous avons premièrement vérifié l'effet seul de la créativité des mouvements (i.e., amplitude et créativité) sur la coordination posturale, sans interaction sociale (situation Solo). Nous nous sommes ensuite focalisés sur l'effet de la coordination interpersonnelle durant l'improvisation dans une seconde partie, avant de discuter de l'ensemble de ces résultats. Dans ces deux parties, nous avons d'abord analysé les mouvements du end-effecteur dans la direction ML, puis la coordination posturale dans les directions ML et AP séparément.

3. 1. Situation Solo

3. 1. 1. End-effecteur

Comme attendu, le test Mann-Whitney réalisé sur l'amplitude maximale des mouvements du end-effecteur dans la direction ML a révélé une plus importante valeur pour le groupe Grand ($1.15 \text{ m} \pm 0.22$) que pour le groupe Petit ($0.40 \text{ m} \pm 0.12$; $U = 0$, $p < 0.001$, $r = 0.77$).

Concernant le pourcentage du spectre significatif (PSS), l'analyse statistique a démontré une différence significative entre le groupe Mono-fréquentiel et le groupe Multi-fréquentiel (0.28 ± 0.18 et 0.48 ± 0.18 respectivement; $U = 405$, $p < 0.001$, $r = 0.47$). L'ensemble de ces résultats confirment que les participants ont bien suivi les instructions : (i) les groupes Petit et Grand ont bien produit des mouvements d'amplitude différentes et (ii) les groupes Mono-fréquentiel et Multi-fréquentiel ont bien réalisé des mouvements de complexité différentes.

3. 1. 2. Coordination posturale

- *Direction ML*

Le test Mann-Whitney réalisé sur la cohérence spectrale croisée (CSC) a indiqué une corrélation plus importante, et donc une plus forte coordination entre les hanches et les chevilles pour le groupe Mono-fréquentiel (0.61 ± 0.31) que pour le groupe Multi-fréquentiel (0.36 ± 0.26 ; $U = 489$, $p < 0.001$, $r = 0.54$). Malgré une tendance observée ($p=0.053$), aucune différence significative entre les groupes Petit et Grand n'a été observée (0.58 ± 0.30 et 0.45 ± 0.31 respectivement).

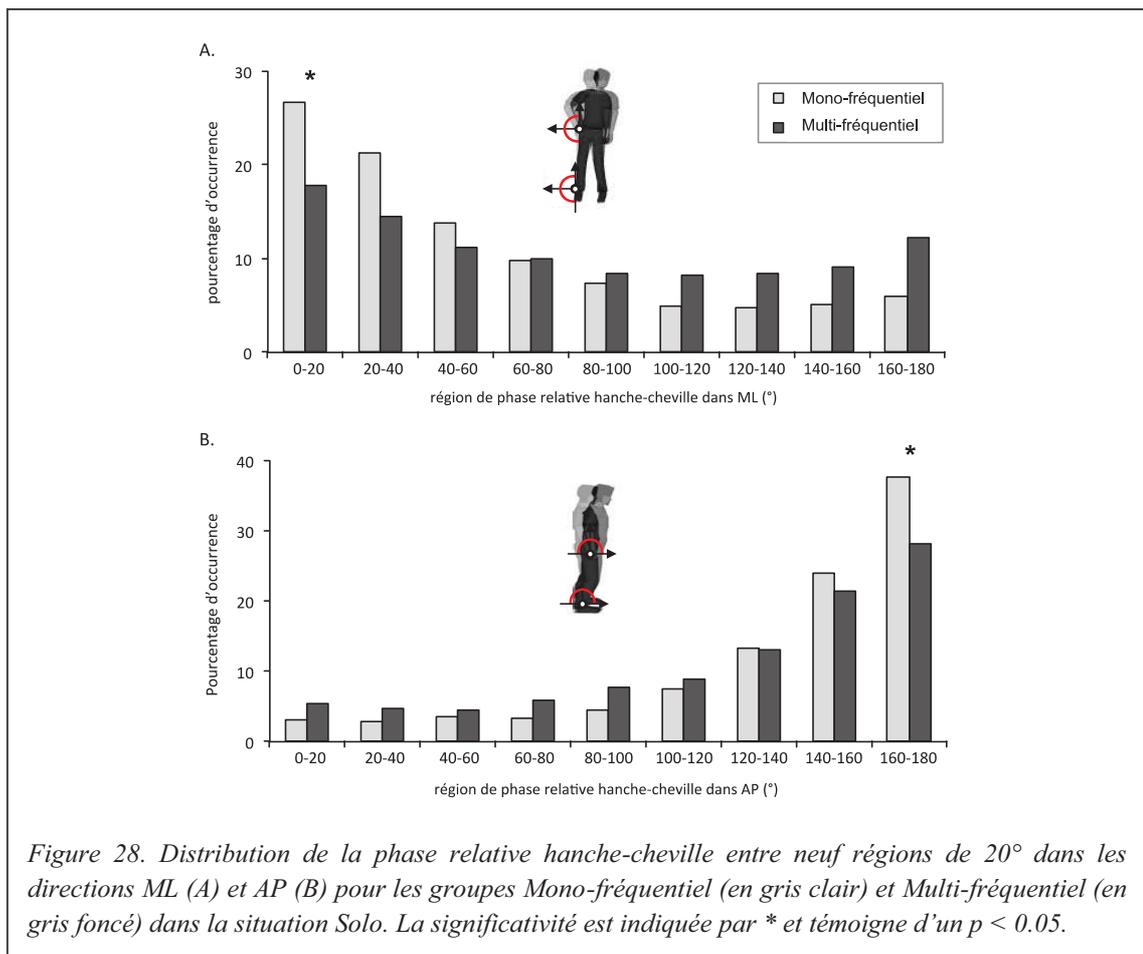
Pour la distribution de la phase relative entre 0 et 180°, une forte occurrence du patron en phase a été observée pour les groupes Petit ($X^2 = 15.5$, $df = 8$, $p < 0.05$), Grand ($X^2 = 63.2$, $df = 8$, $p < 0.001$) et Mono-fréquentiel ($X^2 = 90.8$, $df = 8$, $p < 0.001$), mais pas pour le groupe Multi-fréquentiel ($p = 0.401$). Les comparaisons entre les groupes ont révélé (i) une plus forte occurrence du patron en phase pour le groupe Mono-fréquentiel comparé au groupe Multi-fréquentiel ($U = 658$, $p < 0.05$, $r = 0.31$; Figure 28. A.), et (ii) aucune différence entre les groupes Petit et Grand ($p = 0.74$).

- *Direction AP*

Concernant la CSC, les mêmes résultats que ceux précédemment observés ont montré une plus forte coordination entre les hanches et les chevilles pour le groupe Mono-fréquentiel que pour le groupe Multi-fréquentiel (0.60 ± 0.25 et 0.34 ± 0.25 respectivement; $U = 398$, $p < 0.001$, $r = 0.67$). Aucune différence entre les groupes Petit et Grand n'a été démontrée (0.53 ± 0.25 et 0.45 ± 0.30 respectivement; $p = 0.30$).

L'analyse statistique portant sur la distribution de la phase relative entre 0 et 180° a révélé une plus importante occurrence du patron en antiphase pour l'ensemble

des quatre groupes (Mono-fréquentiel : $X^2 = 176.1$, $df = 8$, $p < 0.001$; groupe Multi-fréquentiel : $X^2 = 102.7$, $df = 8$, $p < 0.001$; groupe Petit : $X^2 = 82$, $df = 8$, $p < 0.001$ et groupe Grand : $X^2 = 188.4$, $df = 8$, $p < 0.001$). Les comparaisons entre groupes ont montré : (i) une plus forte occurrence du patron en antiphase pour le groupe Mono-fréquentiel que pour le groupe Multi-fréquentiel ($U = 648.5$, $p < 0.05$, $r = 0.32$; Figure 28. B.) et (ii) une absence de différence entre les groupes Petit et Grand ($p = 0.65$).



Pour résumer, les résultats sur les essais Solo montrent l'émergence d'une coordination stable hanche-cheville dans les directions instruite ML et non-instruite AP par la tâche (respectivement en phase et en antiphase). Concernant l'impact de la créativité sur la posture, la complexité semble, au contraire de l'amplitude, perturber la coordination posturale et sa stabilité dans les deux directions, et plus encore dans la direction ML (puisque les participants du groupe Multi-fréquentiel n'ont pas présenté de patron de coordination stable dans cette direction).

3. 2. Situations Solo vs. Duo

Puisque nous connaissons désormais l'influence de la créativité sur la posture, nous nous focalisons, dans cette partie, sur l'impact de la coordination interpersonnelle sur la posture dans une situation d'improvisation. Nous comparons ainsi, les conditions Meneur, Suiveur et Solo.

3. 2. 1. End-effecteur

Puisque seule la complexité perturbe la posture, nous avons ici uniquement contrôlé ce paramètre entre nos trois conditions Meneur, Suiveur et Solo. Une ANOVA à mesures répétées a révélé un effet Condition ($F(1.86,98.6) = 58.90, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$). Comme attendu, cette différence montre que les mouvements réalisés dans la situation Duo (Meneur et Suiveur), c'est-à-dire durant l'improvisation, sont significativement plus complexes et créatifs que ceux réalisés dans la situation Solo (respectivement 0.58 ± 0.10 ; 0.58 ± 0.10 et 0.35 ± 0.16 ; $p < 0.001$ pour les deux comparaisons).

3. 2. 2. Coordination posturale

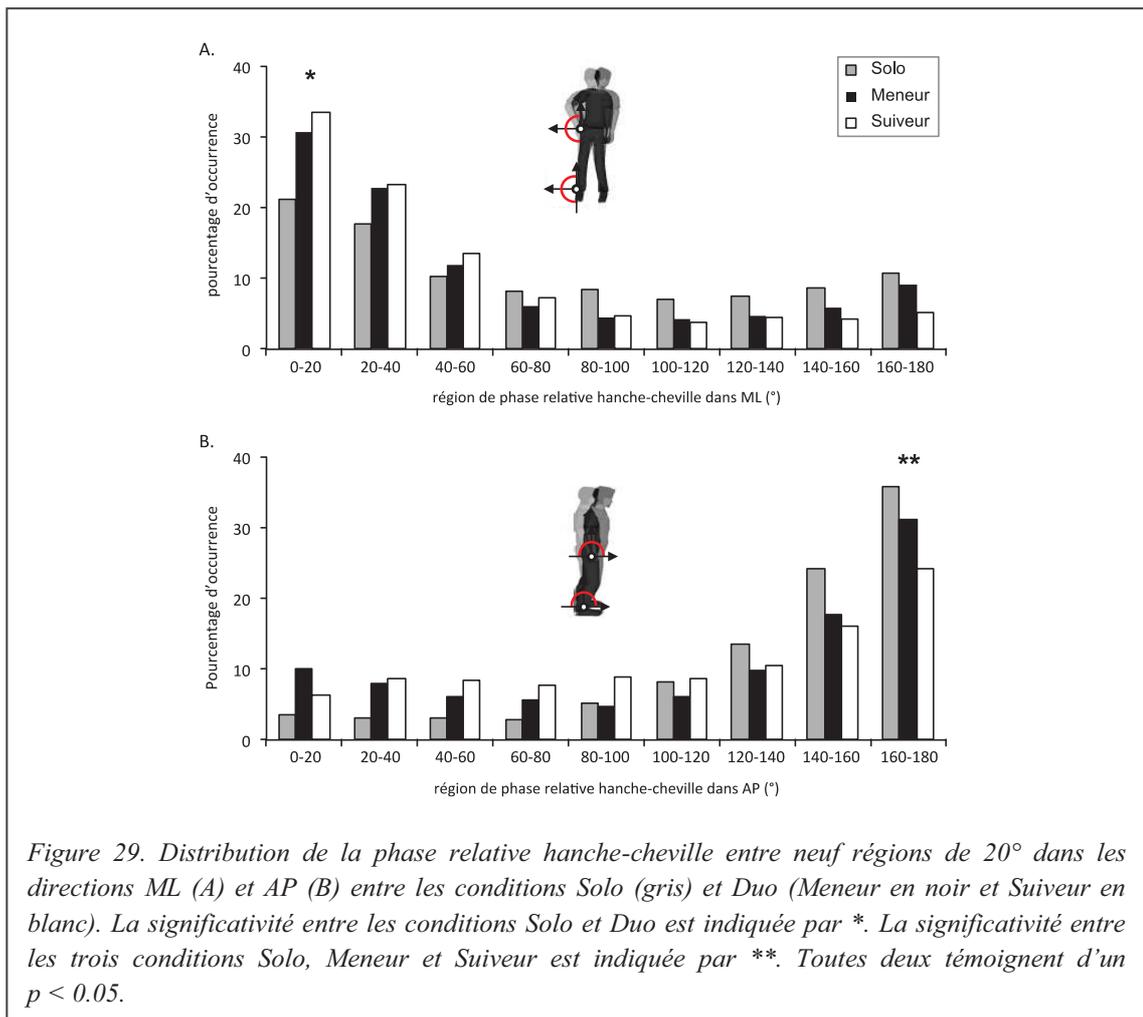
- *Direction ML*

L'ANOVA à mesures répétées réalisée sur CSC n'a pas permis de révéler une différence significative entre les trois conditions (Meneur : 0.50 ± 0.31 ; Suiveur : 0.41 ± 0.25 et Solo : 0.44 ± 0.25 ; $p = 0.26$). En revanche, l'analyse statistique réalisée sur la distribution de la phase relative a indiqué un effet Région ($F(1.88,99.6) = 58.7, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$) montrant l'émergence du patron de coordination posturale en phase ($p < 0.001$). Une interaction Région x Condition ($F(4.48,236.24) = 4.7, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.08$) a révélé une plus forte occurrence du patron en phase pour les conditions Meneur et Suiveur comparées à la condition Solo (Figure 29. A. ; $p < 0.001$ pour les deux comparaisons), mais pas de différence entre Meneur et Suiveur ($p = 0.20$).

- *Direction AP*

Concernant la CSC, l'ANOVA à mesures répétées a montré un effet Condition ($F(2,106) = 11.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.18$) révélant une corrélation plus importante, et donc une plus forte coordination entre les hanches et les chevilles dans la condition Solo ($F(2,106) = 11.5, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.18$) que dans les conditions Meneur et Suiveur (respectivement, 0.31 ± 0.24 et 0.30 ± 0.22 ; $p < 0.001$ pour les deux comparaisons).

Finalement, pour la distribution de la phase relative, l'ANOVA a dévoilé un effet Région ($F(1.95,103.46) = 83.39, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.60$) confirmant l'émergence générale du patron de coordination posturale en antiphase dans cette direction ($p < 0.001$). Une interaction Région x Condition ($F(3.6,190.8) = 6.65, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.11$) a également été trouvée, indiquant une plus forte occurrence du patron en antiphase pour la condition Solo comparée aux conditions Meneur et Suiveur ($p < 0.001$ pour les deux comparaisons). L'occurrence du patron en antiphase était également plus importante dans la condition Meneur que Suiveur ($p < 0.001$; Figure 29. B.).



Pour résumer, les résultats confirment l'émergence du patron de coordination posturale en phase dans la direction ML et en antiphase dans la direction AP. De plus, il semblerait que la coordination interpersonnelle (Meneur et Suiveur) stabilise la posture de chaque individu, mais uniquement dans la direction ML. Le suiveur semble, lui, moins stable dans la direction AP que le meneur.

4. Discussion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier la dynamique de coordination posturale dans une situation d'improvisation socio-motrice. Tout d'abord, un patron en phase a été retrouvé dans la direction ML alors qu'un patron en antiphase a été observé dans la direction AP. Une manière d'interpréter ces résultats est de les regarder à travers la notion de stabilité. Cependant afin de mieux comprendre la suite de notre propos, nous envisageons deux types de stabilité. La *stabilité dynamique* fait référence à la capacité du système à résister à une perturbation en maintenant son patron stable de coordination ou en transitant d'un état stable à un autre si la perturbation est trop importante (e.g., Bardy et al., 2002; Newell, Vanemmerik, Lee, & Sprague, 1993). Cette stabilité est notamment dépendante de la fréquence du mouvement : le patron en phase étant plus stable pour de faibles fréquences (Bardy et al., 2002). Pour les mouvements du bras, une fréquence proche de 1 Hz (0.79 Hz; Abe & Yamada, 2001), serait suffisante pour basculer d'un état stable à un autre. Or, dans notre expérience, la fréquence moyenne de mouvement était deux fois moindre ($m = 0.38$ Hz), favorisant ainsi l'émergence du patron en phase. Un autre type de stabilité, la *stabilité mécanique*, fait, quant à lui, référence au maintien de l'équilibre impliquant les déplacements du centre de masse ou du centre de pression. Le patron en antiphase est alors le plus stable car limitant ces déplacements (e.g., Bonnet et al., 2011). Pris ensemble, ces résultats nous indiquent que ce type de tâches nécessite (i) l'adoption du patron le plus stable dynamiquement, dans la direction instruite, pour accompagner les mouvements du end-effecteur (ii) tout en préservant l'équilibre dans la direction non-instruite.

Par rapport à notre objectif initial, nos résultats semblent indiquer des effets différents de la créativité motrice et de la coordination interpersonnelle sur la stabilité posturale. Bien qu'ici elle ait été manipulée et non improvisée (i.e., situation Solo), la créativité motrice tendrait à perturber la posture. Nous observons, en effet, une

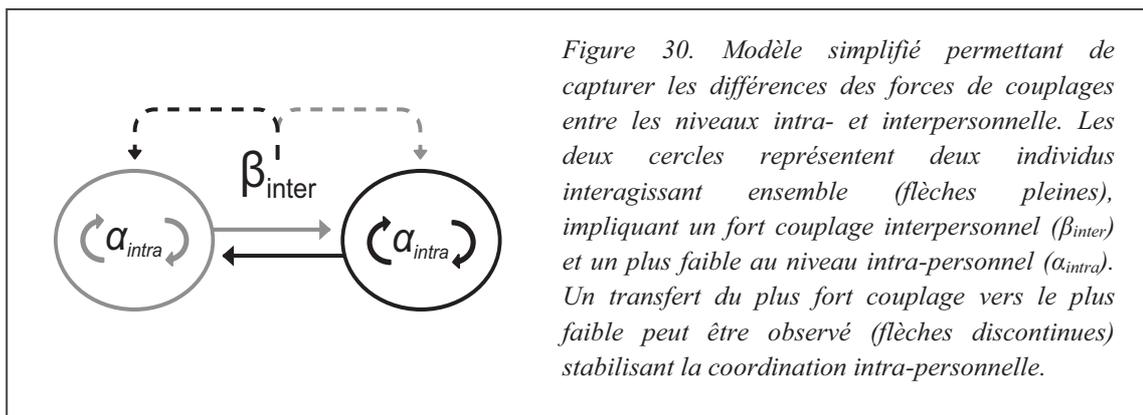
diminution de la stabilité posturale dans les deux directions lorsque les participants produisaient des mouvements complexes. Ces résultats corroborent ceux observés lors de production de mouvements bilatéraux (Forner-Cordero et al., 2007) ou lors du contrôle postural sur un bateau (Stoffregen, Chen, Varlet, Alcantara, & Bardy, 2013). En mer, le système postural est contraint par des oscillations multi-fréquentielles complexes induisant une perte de stabilité posturale. Nous étendons ici ces résultats en démontrant que produire des mouvements complexes (unilatéraux) entraîne également une perte de stabilité posturale. Cet effet serait, comme attendu, plus marqué pour la direction ML que pour la direction AP, étant donné la perte de stabilité du patron de coordination posturale en ML pour les participants réalisant les mouvements complexes.

Néanmoins, les résultats concernant l'amplitude tempèrent quelque peu notre interprétation. Nos résultats n'ont, effectivement, démontré aucune différence entre nos groupes Petit et Grand, et ce, dans les deux directions. Ces résultats sont assez surprenants puisque Marin et collaborateurs (1999) avaient observé qu'une amplitude de mouvements de la tête (et donc du tronc) de 0.23 cm était suffisante pour perturber la stabilité posturale. Or, dans notre expérience, la manipulation de l'amplitude des mouvements du bras n'a pas suffisamment impacté les déplacements du tronc des participants¹⁷, donnant ainsi des valeurs plus faibles que celle observée par Marin et collègues. Une seconde explication possible est liée à une adaptation fonctionnelle des sujets à la tâche. Les participants réalisant les mouvements de grande amplitude ont pu redistribuer leur poids de corps d'un pied sur l'autre afin d'accompagner les mouvements du bras de gauche à droite, menant alors à des oscillations posturales en phase dans la direction ML. Cette adaptation, liée aux déplacements du centre de pression, a notamment été observée dans des situations de station debout prolongé (Duarte, Harvey, & Zatsiorsky, 2000; Duarte & Zatsiorsky, 1999).

A l'inverse, la coordination interpersonnelle semble, elle, avoir un effet positif sur la stabilité posturale. Alors que les participants produisent des mouvements plus complexes dans la situation Duo que dans la situation Solo, nous observons une plus forte occurrence du patron en phase pour le meneur et le suiveur, suggérant un effet positif de la coordination interpersonnelle dans la direction ML. Nous pensons que le différentiel de force de couplage entre la coordination interpersonnelle et la coordination intra-personnelle posturale permet d'expliquer ces résultats. La figure 30

¹⁷ Des déplacements du tronc de 0.04 et de 0.19 m ont été observés pour les groupes Petit et Grand.

illustre notre modèle. Dans la situation Duo, la coordination interpersonnelle β_{inter} est intentionnelle (avec une force de couplage forte), alors que la coordination intra-personnelle posturale α_{intra} est, elle, spontanée (avec une force de couplage plus faible) dans la direction ML. Nous pensons que le fort couplage interpersonnel β_{inter} est transféré au couplage intra-personnel α_{intra} plus faible, renforçant ainsi cette coordination posturale dans la situation Duo. Cependant, il semble que cet effet soit limité à la direction ML puisque nous observons, au contraire, une perte de stabilité posturale dans la direction AP. Dans cette direction, la coordination interpersonnelle β_{inter} n'est pas intentionnelle (puisque non demandée par la tâche). La force de couplage est alors plus faible que dans la direction AP, ne permettant pas un transfert suffisamment puissant et efficace au niveau de la coordination intra-personnelle posturale α_{intra} . Ainsi, l'effet délétère de la créativité motrice (i.e., complexité) n'est alors pas contrebalancé, donnant lieu à une perte de stabilité posturale dans la direction AP.



Finalement, la condition Meneur-Suiveur nous a permis de manipuler la directionnalité du couplage en faveur d'un des participants (i.e., le suiveur). Nous nous attendions ainsi à un effet plus marqué de la coordination interpersonnelle dans la direction ML pour le suiveur. Or, ce n'est pas le cas. Nous pensons néanmoins que ce résultat n'infirme pas forcément notre hypothèse. En effet, une manière d'interpréter ces résultats est liée à la présence d'une signature motrice particulière du suiveur. Comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 3, le mouvement du suiveur est caractérisé par la présence d'un composant haute fréquence, reflétant l'incertitude inhérente au rôle de suiveur. Dans la direction ML, cette incertitude a pu entraîner une instabilité posturale, contrebalançant l'effet plus marqué de la coordination interpersonnelle sur la posture du

suiveur. Le meneur est, quant à lui, à la fois moins impacté par la coordination interpersonnelle et pas du tout impacté par cette incertitude, puisqu'il mène l'interaction. Ainsi, la stabilité posturale entre les deux participants est nivelée, expliquant l'absence de différences entre les deux rôles dans la direction ML. À l'inverse, dans la direction AP, où l'effet de la coordination interpersonnelle n'est pas observé, le suiveur est sujet à cette incertitude induisant ainsi une moindre stabilité posturale que le meneur.

Pris ensemble, ces résultats ont permis de mettre en avant l'effet d'une situation d'improvisation socio-motrice, telle que le jeu en miroir, sur le comportement moteur intra-personnel (i.e., la posture). Bien qu'ils puissent être critiqués, ces résultats démontrent, tout d'abord, une émergence de patrons stables de coordination posturale dans ce type de situation. Plus précisément, (i) un patron en phase émerge dans la direction instruite par la tâche afin d'accompagner et faciliter les mouvements produits et (ii) un patron en antiphase apparaît dans la direction AP pour maintenir un certain équilibre postural. (iii) Alors que la créativité motrice (et notamment la complexité) perturbe la stabilité posturale en l'absence d'interaction sociale, la coordination interpersonnelle contrebalance cet effet et favorise la stabilité posturale, dans la direction ML, afin d'accompagner la production des mouvements du bras. À l'inverse, l'effet de la coordination interpersonnelle sur la posture dans la direction AP n'est pas observé. (iv) Finalement, l'instabilité posturale dans la direction AP est plus marquée chez le suiveur, de par l'incertitude inhérente à ce rôle social.

Résumé

L'objectif de ce chapitre était d'explorer l'effet de l'improvisation socio-motrice, à l'aide du jeu en miroir, sur la dynamique de coordination posturale de chaque individu.

Nos résultats indiquent que la coordination posturale de sujets sains novices en improvisation est influencée de manière différente par la créativité motrice et par la coordination entre ces mouvements.

La créativité motrice (à travers la complexité) semble perturber la stabilité posturale dans les directions instruites et non-instruites. La coordination interpersonnelle semble, elle, favoriser la stabilité posturale si le couplage entre les deux individus est fort. Finalement, cet effet, plus marqué chez le suiveur, est contrebalancé par l'incertitude inhérente à ce rôle là, créant une instabilité posturale comme illustrée dans la direction AP.

Chapitre 5

Improvisation socio-motrice & Schizophrénie

Gueugnon, M., Marin, L., Coste, A., Slowinski P., Zhao, Z., Bardy, B. G., & Salesse, R. N. (en prép.). Improvisation in Schizophrenia. *Nature Scientific Reports*.

Salesse, R. N., **Gueugnon, M.**, Bortolon C., Zhao Z., Raffard S., Marin L., Miezal M., Henriques J., Schmitz N., Stricker D., Slowinski P., Tsaneva-Atanasova K., Zhai C., Di Bernardo M., Bardy B. G., Attal J., & Capdevielle D. (en prép.). Virtual self-similarity overcomes schizophrenic socio-motor deficits in the mirror game. *Nature Scientific Reports*

Marin L., Salesse R.N., Bortolon C., **Gueugnon, M.**, Zhao Z., Raffard S., Capdevielle D., Schmidt R.C., Schmitz N., Henriques J., Stricker D., Di Bernardo M., Tsaneva-Atanasova K., Slowinski P., Zhai C., & Bardy B.G. (2015). Does similarity promote social interaction in schizophrenia? *18th International Conference of Perception & Action (ICPA)*. 14-18 Juillet. Minneapolis, MN, USA. Communication orale.

1. Introduction

Précédemment, nous avons démontré que les capacités d'improvisation pouvaient être améliorées et acquises chez des sujets sains. Certains auteurs ont, d'ailleurs, montré que l'expertise en activités d'art influençait positivement ces capacités (Noy et al., 2011; Issartel et al., 2006a; Schmidt et al., 2011; Washburn et al., 2014). Plus précisément, l'amélioration de ces capacités est observée au niveau de la créativité motrice et de la coordination entre les personnes, deux paramètres primordiaux dans le succès des interactions sociales quotidiennes. A l'inverse de ces experts qui peuvent être considérés comme « pro-sociaux », certaines personnes souffrant de pathologies sociales présentent, quant à elles, un déficit d'interaction sociale. C'est le cas, par exemple, d'individus atteints de schizophrénie. Cette maladie mentale entraîne un retrait de la vie quotidienne, pouvant mener jusqu'à un sérieux isolement social (Giacco et al., 2012; Thornicroft et al., 2004). Parmi d'autres candidats possibles, d'importants troubles de la communication non-verbale pourraient être à l'origine de ce déficit social.

Le trouble de communication non-verbale est notamment observé par deux faits majeurs. Premièrement, la production de gestes accompagnant le discours (i.e., gestes co-verbaux) est moins importante lorsqu'un individu souffre de schizophrénie (Brune et al., 2008; Del-Monte et al., 2013; Kupper et al., 2010; Troisi et al., 1998). La variété des réponses motrices est aussi négativement impactée par cette pathologie, menant à des réponses plus régulières et moins riches (Baek et al., 2013). Considérant notre définition de la créativité (cf. Chapitre 1. 2. 1.), ces différentes études suggèrent que la pathologie schizophrénique affecte négativement la créativité motrice observable dans les interactions sociales. Deuxièmement, cette maladie affecte également les coordinations entre le mouvement des patients et leur environnement (Lazerges et al., 2011). Il a, par exemple, été montré que les patients souffrant de schizophrénie éprouvaient plus de difficultés à coordonner leurs mouvements avec ceux d'autrui, lorsqu'il leur était explicitement demandé de se synchroniser (Varlet et al., 2012). Bien que l'ensemble de ces résultats suggère un effet délétère de la schizophrénie sur les capacités d'improvisation en général, ces capacités n'ont, pour l'heure, pas été totalement et objectivement évaluées dans une situation d'improvisation. C'est-à-dire dans une situation expérimentale où la créativité est centrale. En effet, les paradigmes expérimentaux et/ou les méthodes utilisées ne permettent pas d'identifier clairement

l'influence de la pathologie sur ces capacités. Démontrer les conséquences de la pathologie sur les capacités d'improvisation pourrait permettre de mieux comprendre le déficit d'interaction sociale, illustrée par une altération de la créativité et de la coordination chez les patients atteints de schizophrénie. D'un point de vue clinique et thérapeutique, cela ouvrirait également de nouvelles pistes de réflexion sur la mise en place de protocole de réhabilitation, impliquant notamment des tâches de coordination et de créativité motrice. L'objectif d'une telle réhabilitation serait ainsi d'accroître les compétences socio-motrices dans une situation d'improvisation, puis de transférer ces compétences dans la vie quotidienne des patients.

Ainsi, ce chapitre évalue le déficit d'interaction sociale de personnes atteintes de schizophrénie au travers d'une tâche d'improvisation socio-motrice. Nous nous demandons si le déficit social observé chez les personnes souffrant de schizophrénie peut avoir une influence directe sur leur performance. Pour ce faire, nous avons introduit la tâche de jeu en miroir (utilisée dans les chapitres précédents). Nous faisons l'hypothèse que les personnes souffrant de schizophrénie ont de moins bonnes capacités d'improvisation illustrées par une plus faible créativité motrice, mais aussi par une plus faible coordination interpersonnelle. D'autre part, l'investigation des capacités d'improvisation des patients atteints de schizophrénie pourrait ouvrir de nouvelles perspectives dans la compréhension du déficit d'interaction sociale de ces patients. En effet, le jeu en miroir utilisé dans ce chapitre comprend, non plus une interaction entre deux partenaires réels, mais une interaction entre un participant et un partenaire virtuel animé. L'un des avantages de ce protocole est de pouvoir manipuler la qualité de l'interaction à travers la performance de ce partenaire virtuel. Dans ce jeu en miroir, le but est de coordonner des mouvements créatifs et complexes avec ceux d'un partenaire. Nous avons ainsi manipulé la capacité de coordination de l'agent virtuel afin de modifier la qualité de l'interaction. Lors d'une interaction, il est nécessaire d'adapter ses mouvements aux gestes de l'autre individu (Ekman & Friesen, 1969). De par la présence de troubles perceptivo-moteurs agissant sur le comportement schizophrénique, il est tout à fait envisageable d'observer également un déficit d'adaptation de leur comportement durant l'interaction (Chen et al., 1999; McGhie & Chapman, 1961). Ainsi, nous pensons que les participants sains sont capables d'adapter leurs mouvements, et donc leur créativité et leur coordination, en fonction de la performance de leur partenaire virtuel. A l'inverse, nous nous attendons à ne trouver aucune différence dans le comportement des personnes souffrant de schizophrénie dans les

conditions où l'interaction est de moins bonne qualité (i.e., où le partenaire virtuel est perturbé). En d'autres termes, nous prédisons que le déficit d'interaction sociale, connu dans la schizophrénie, est illustré par une diminution des capacités d'improvisation (créativité et coordination), mais aussi par une adaptation plus limitée du comportement moteur durant l'interaction.

2. Méthode

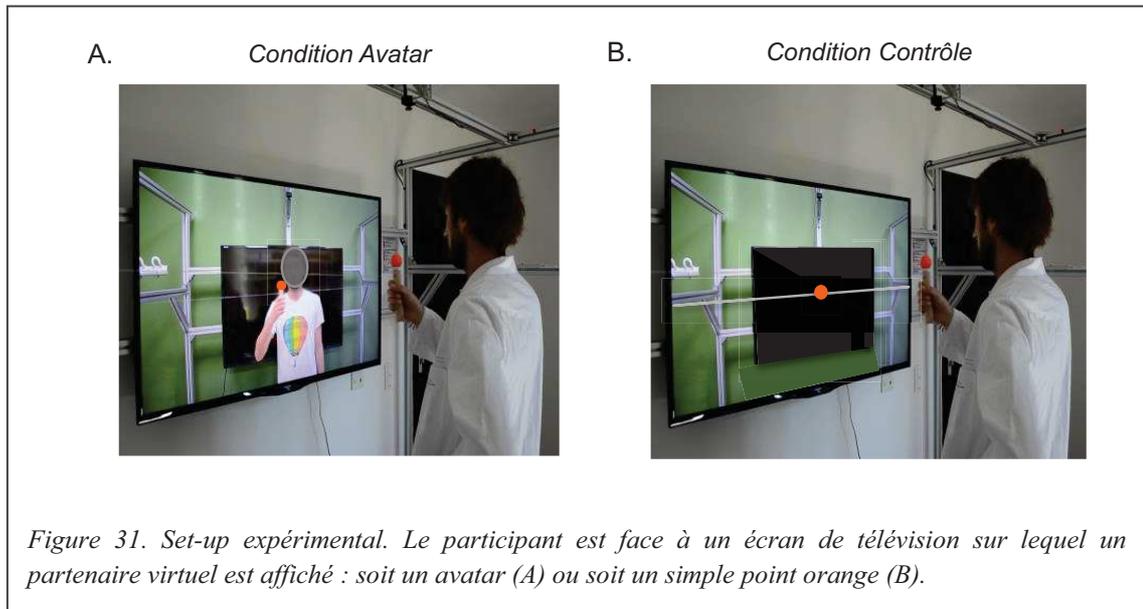
2.1. Participants

Cinquante-neuf participants ont été inclus dans cette expérience : (i) 29 sujets sains (4 femmes ; âge moyen de 31 ans \pm 5.8) composant le *groupe Contrôle*, (ii) et 30 personnes souffrant de schizophrénie (3 femmes ; âge moyen de 33.8 ans \pm 10.2) composant le *groupe Expérimental*. Ces deux groupes étaient comparables en genre, en âge et en niveau d'éducation. Les patients ont été recrutés au sein du Service de Psychiatrie pour Adulte du Centre Hospitalier Régional Universitaire de Montpellier (CHRU). Ils ont tous été diagnostiqués comme souffrant de schizophrénie (selon les critères du DSM-V) par la structure médicale et recevaient un traitement médicamenteux basé sur des antipsychotiques. Tous les patients inclus étaient dans une phase stable de la pathologie. Les sujets du groupe Contrôle ne présentaient, eux, aucun trouble psychologique connu. Tous les participants avaient pour langue maternelle le français et comprenaient parfaitement la tâche à réaliser. Tous ont reçu et signé un consentement de participation à l'expérience, approuvé par le Comité de Protection des Personnes (CPP Sud Méditerranée III, Nîmes, France, #2013.03.05) du CHRU de Montpellier. L'expérience s'est déroulée sur le site de l'hôpital de jour « La Colombière » à Montpellier.

2.2. Set-up expérimental

Chaque participant était debout face à un écran de télévision de 151 cm de diagonale, situé à 1 mètre, et tenait un stick avec leur main dominante. Ce stick, placé à une distance de 45 cm devant le participant, était attaché à un fil en nylon transparent d'une longueur de 1.80 m. Le fil était positionné horizontalement à hauteur d'épaules. Une balle orange était située au dessus de ce stick. Une caméra, placée 1 m au-dessus de

la balle, enregistrait les déplacements de la balle le long du fil en nylon avec une fréquence d'échantillonnage de 40 Hz. Un partenaire virtuel animé était affiché sur l'écran. Deux partenaires virtuels étaient susceptibles d'être affichés sur l'écran selon les conditions : (i) un avatar (i.e., humain virtuel ; *Condition Avatar*) possédant les mêmes caractéristiques et le même dispositif que le participant (ii) et un unique point orange (*Condition Contrôle* ; Figure 31.).



2. 3. Procédure expérimentale

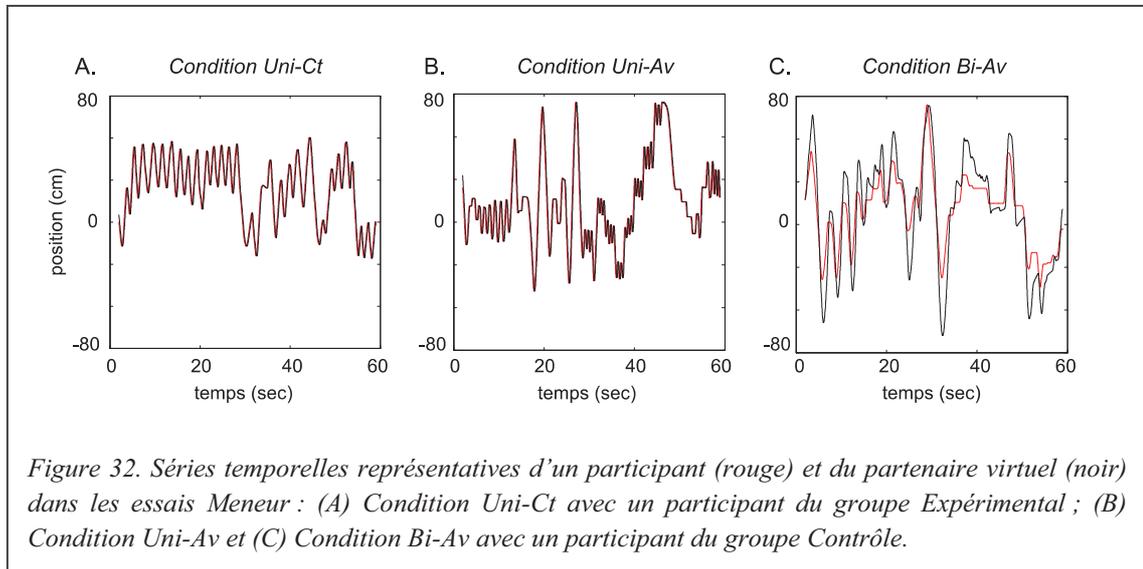
Dans cette tâche d'improvisation, le participant et son binôme virtuel devaient « créer des mouvements complexes, variés et intéressants tout en restant le plus coordonnés possible » en déplaçant le stick qu'ils tenaient le long du fil. Le partenaire virtuel était animé par une *architecture cognitive interactive* (ACI; Zhai, Alderisio, Tsaneva-Atanasova, & di Bernardo, 2014) permettant de déplacer la balle ou le point orange le long de leur propre fil. L'expérience était composée de deux essais différents. Dans les *essais Meneur*, le participant menait l'interaction et créait les mouvements complexes et improvisés tandis que son binôme virtuel suivait et reproduisait ses mouvements. A l'inverse, dans les *essais Suiveur*, le participant devait suivre et reproduire les mouvements de son partenaire virtuel menant l'interaction.

2. 3. 1. Essais Meneur

Dans ces essais, la créativité des participants était mise en jeu puisque chaque participant devait improviser des mouvements complexes et variés face à un partenaire virtuel qui l'imitait. Plusieurs partenaires virtuels ont été utilisés ici afin de modifier l'interaction sociale. A l'instar de l'apparence (i.e., avatar ou point orange), la capacité du partenaire virtuel à se coordonner a également été manipulée, à l'aide de l'ACI.

Dans un cas, le partenaire virtuel reproduisait les mouvements du participant avec un délai constant d'environ 200 ms. Il s'agit ici d'une condition Unidirectionnelle puisque, quelque soient les mouvements du participant, le délai entre les mouvements reste constant et ne dépend ainsi que de l'ACI. Dans un second cas, nous avons perturbé le comportement du partenaire virtuel. Bien que l'avatar devait imiter les mouvements du participant, il produisait également ses propres mouvements. Pour faire cela, nous avons introduit dans l'ACI une composante de production de mouvements préenregistrés issus d'un essai antérieur du participant. Au préalable de l'expérience, chaque participant devait réaliser des mouvements d'improvisation mais sans partenaire (essai solo). Nous avons ensuite extrait une séquence de ce signal, puis l'avons intégré dans l'ACI afin que le partenaire virtuel produise ses propres mouvements. Le comportement du partenaire virtuel correspondait à un mélange entre les mouvements du partenaire humain et les mouvements préenregistrés. La règle d'intégration de ces deux cinématiques était basée sur la différence de position entre le partenaire humain et le partenaire virtuel. Lorsque cette différence était nulle, le partenaire adoptait la cinématique préenregistrée. Lorsque cette différence était non-nulle, l'ACI effectuait une moyenne pondérée entre les mouvements préenregistrés et la position réelle du participant. Au final, trois conditions d'interaction ont été réalisées dans ces essais Meneur : (i) une condition *Unidirectionnel-Contrôle*, (ii) une condition *Unidirectionnel-Avatar*, (iii) et une condition *Bidirectionnel-Avatar* (Uni-Ct, Uni-Av et Bi-Av, respectivement). Les deux premières conditions correspondaient à des interactions simples, puisque les partenaires virtuels parvenaient à reproduire les mouvements du participant tout en se coordonnant à lui. A l'inverse, la condition Bi-Av constituait la condition la plus difficile et nécessitait une adaptation de la créativité motrice du participant afin de réussir l'interaction (i.e., baisse de la créativité afin que l'avatar se coordonne correctement). La figure 31 représente les trois différentes conditions, montrant bien que le délai est constant et la coordination quasi parfaite pour les deux

premières conditions (Figure 32. A. et B.), comparées à la condition Bi-Av (Figure 32. C.). Pour chaque condition, trois essais d'une minute ont été effectués par l'ensemble des participants.



2. 3. 2. Essais Suiveur

Dans ces essais, le participant devait suivre les mouvements de son binôme. Seulement deux conditions d'interaction ont été réalisées ici. Pour ces deux conditions, le même avatar que celui adopté lors des essais meneur a été utilisé. Nous avons cependant joué sur l'ACI afin de manipuler la qualité de l'interaction. L'avatar, animé par l'ACI, menait l'interaction et produisait ainsi des mouvements. Dans une condition, il générait des mouvements tout en gardant le profil de vitesse du participant¹⁸ (Zhai et al., 2014) : c'est la condition *Pro-sociale*. Cette condition favorisait la coordination puisque le participant et l'avatar produisaient, tous deux, des mouvements dont les profils de vitesse étaient identiques (Slowinski et al., 2016). Dans la seconde (i.e., condition *Anti-sociale*), l'avatar générait des mouvements avec le profil de vitesse du participant dans lequel un signal de bruit de 2.5 Hz a été ajouté afin de perturber l'interaction (Slowinski et al., 2016). Cette condition impliquait plus d'incertitudes et de difficultés pour se coordonner. Un essai de 30 secondes de chaque condition a été réalisé par tous les participants.

¹⁸ Obtenu lors de l'essai solo réalisé avant l'expérience par chaque individu.

Pour résumer, chaque individu a réalisé trois essais Meneur par condition (conditions Uni-Ct, Uni-Av et Bi-Av) et un essai Suiveur par condition (conditions Pro-sociale et Anti-sociale).

2. 4. Traitement des données

Pour l'ensemble des essais (i.e., Meneur et Suiveur), les séries temporelles du participant et de l'avatar ont été enregistrées, recentrées autour de 0 et filtrées à l'aide d'un filtre Butterworth passe-bas, d'ordre deux avec une fréquence de coupure de 5 Hz.

2. 4. 1. Essais Meneur

Dans ces essais, la créativité des participants a été mesurée au travers de deux variables. Premièrement, nous avons utilisé la somme du spectre de puissance, obtenue à l'aide d'une transformée en ondelettes (SomSpectre ; cf. Chapitre 2. 1. 1.). Elle renseigne sur le contenu fréquentiel du mouvement. Plus la valeur est haute et plus le mouvement est considéré comme créatif. Une seconde variable, l'index de complexité (IndC) a été calculé (cf. Chapitre 2. 1. 2.). Plus cet index est élevé et plus le mouvement est complexe et créatif. Les trois essais de chaque condition ont été moyennés pour obtenir une valeur moyenne par condition et pour chaque participant. Afin d'observer une différence entre les groupes et entre les conditions, nous avons soumis ces deux variables à une ANOVA à mesures répétées à un facteur de groupes (Contrôle et Expérimental) et un facteur de mesures répétées Condition (Uni-Ct, Uni-Av et Bi-Av).

2. 4. 2. Essais Suiveur

Dans les essais Suiveur, la coordination entre les deux partenaires a été mesurée à l'aide de l'erreur de position relative (ERP) décrite dans le Chapitre 2. 2. 2. 3. Cette variable est particulièrement adaptée dans les interactions motrices Meneur-Suiveur (Slowinski et al., 2016). Plus cette valeur est proche de 0 et meilleure est la coordination. Une valeur positive indique que le participant est en retard par rapport au partenaire virtuel menant l'interaction. Cette variable a ensuite été soumise à une ANOVA à mesures répétées à un facteur de groupes (Contrôle et Expérimental) et un facteur de mesures répétées Condition (Pro-sociale et Anti-sociale).

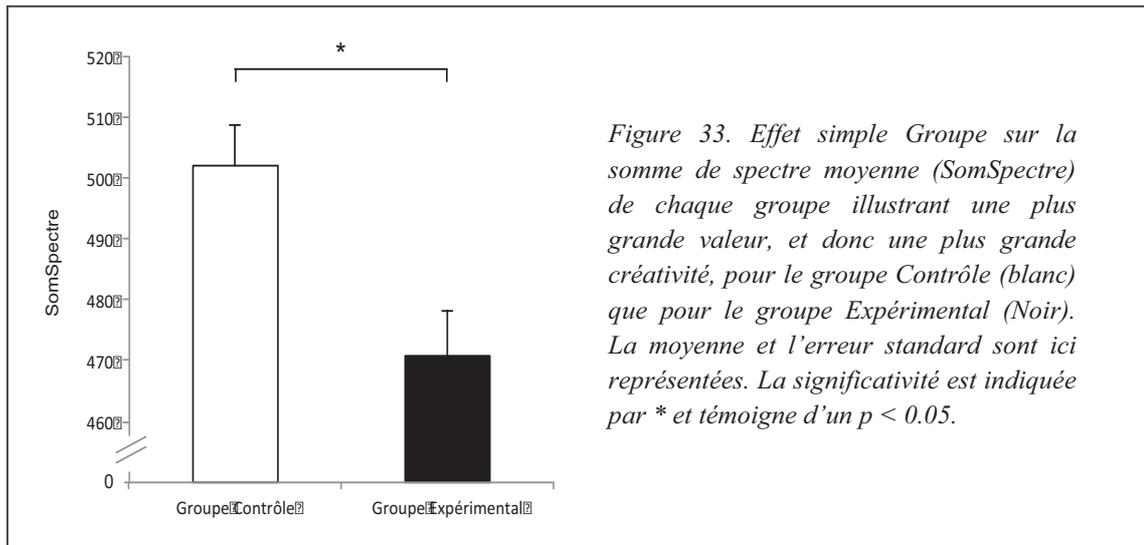
Pour l'ensemble des analyses statistiques, des tests post-hoc de Newman-Keuls ont été effectués, si nécessaire, afin de déterminer la nature des effets. Une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée aux données lors de la violation de la sphéricité. La taille des effets obtenus avec les ANOVAs a été calculée à l'aide de l'éta carré partiel η_p^2 (Bakeman, 2005) et interprétée d'après Cohen (1988) où une valeur comprise entre 0.02 et 0.13 correspond à un petit effet ; une valeur comprise entre 0.13 et 0.26 à un effet moyen et une valeur supérieure à 0.26 à un grand effet.

3. Résultats

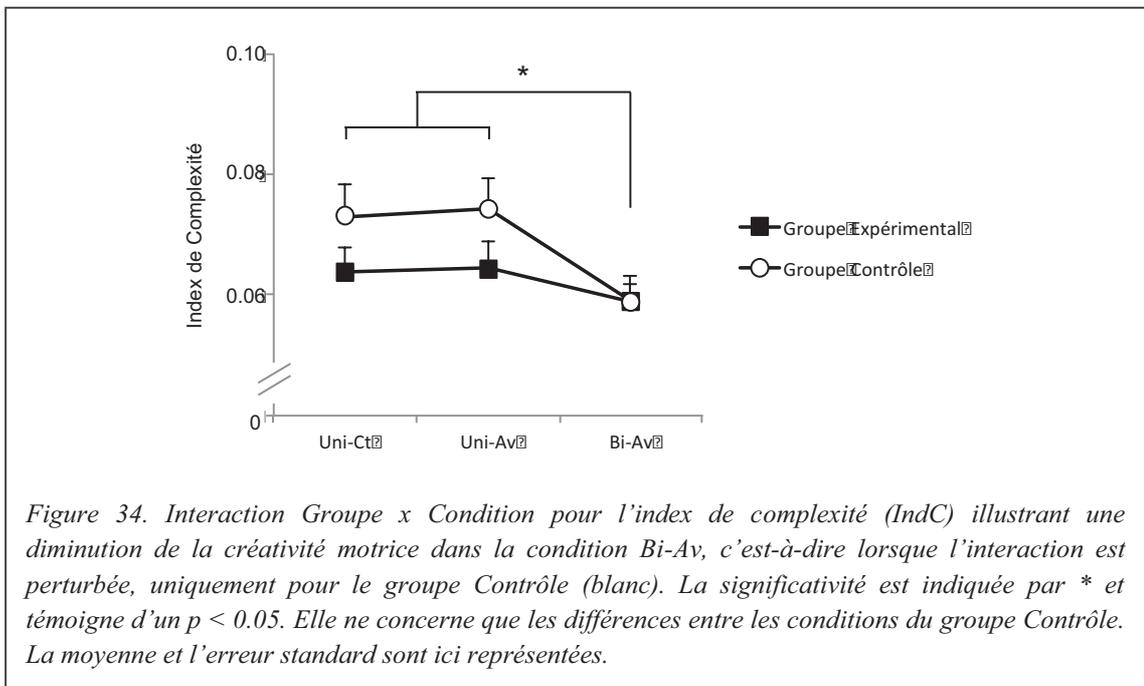
Dans cette section, nous avons premièrement analysé la créativité motrice des participants dans les essais Meneur ; puis dans un second temps, la coordination motrice dans les essais Suiveur.

3.1. Essais Meneur

L'ANOVA à mesures répétées à un facteur de groupes (Contrôle et Expérimental) et un facteur de mesures répétées Condition (Uni-Ct, Uni-Av et Bi-Av) réalisée sur la somme du spectre de puissance (SomSpectre) a révélé un effet simple Groupe ($F(1,57) = 4.07, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.07$) et un effet simple Condition ($F(2,114) = 18.59, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.25$) indiquant respectivement (i) un spectre de puissance plus important pour le groupe Contrôle que pour le groupe Expérimental et (ii) un spectre de puissance plus petit pour la condition Bi-Av (464.67 ± 69.63) comparée aux conditions Uni-Ct et Uni-Av (496.3 ± 65.14 et 497.53 ± 66.35 respectivement; $p < 0.05$ pour les deux comparaisons). La figure 33 illustre l'effet Groupe obtenu. De plus, une intéressante tendance Groupe x Condition ($p = 0.07$) semble suggérer une évolution de cette variable différente entre les groupes pour chaque condition: à savoir que le groupe Contrôle semble adapter sa créativité à l'interaction contrairement au groupe Expérimental.



La même ANOVA, réalisée sur l'index de complexité (IndC), a révélé un effet simple Condition similaire ($F(1.7,96.8) = 15.08, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.21$) confirmant les différences observées entre les conditions Uni (Uni-Ct : 0.068 ± 0.025 ; Uni-Av : 0.069 ± 0.027) et Bi-Av (0.059 ± 0.019). Une interaction Groupe x Condition a, cette fois-ci, été observée ($F(1.7,96.8) = 3.49, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.06$) confirmant la tendance observée pour la variable précédente : seul le groupe Contrôle a adapté sa créativité à l'interaction contrairement au groupe Expérimental (Figure 34.).



3. 2. Essais Suiveur

L'ANOVA à mesures répétées à un facteur de groupes (Contrôle et Expérimental) et un facteur de mesures répétées Condition (Pro-sociale et Anti-sociale) réalisée sur l'erreur de position relative (EPR) a uniquement révélé un effet simple Condition ($F(1,57) = 16.56, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.07$) révélant une valeur inférieure pour la condition Pro-sociale que pour la condition Anti-sociale. En d'autres mots, la coordination était meilleure pour la condition Pro-sociale que pour la condition Anti-sociale. Finalement, aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes, ni par effet simple ($p = 0.30$) ni par interaction ($p = 0.60$).

4. Discussion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier les capacités d'improvisation de personnes atteintes de schizophrénie. Nos résultats suggèrent que cette maladie mentale altère la créativité motrice. En effet, lorsque les individus du groupe expérimental devaient mener l'interaction, ils produisaient des mouvements moins créatifs et complexes que les participants du groupe contrôle. Ces résultats quantifient objectivement le déficit socio-moteur causé par la schizophrénie, en démontrant que la créativité, paramètre important dans les interactions sociales, est altérée. Cela corrobore une partie de la littérature, montrant que la schizophrénie entraîne une réduction de la quantité de mouvements produits durant une interaction, et plus généralement, une diminution de la communication non-verbale (Condon & Ogston, 1966; Del-Monte et al., 2013; Kupper et al., 2010; Lavelle et al., 2012; Troisi et al., 1998). De plus, notre protocole nous a permis de manipuler la performance du partenaire virtuel afin d'explorer l'adaptation des mouvements du participant selon la qualité de l'interaction. Cette capacité d'adaptation est nécessaire afin d'interagir de la manière la plus efficace et efficiente possible avec autrui (Ekman & Friesen, 1969). Nos résultats illustrent ce phénomène indiquant que les individus du groupe contrôle adaptent bien leurs comportements en fonction de la performance du partenaire. Ainsi, quand il mène l'interaction, l'individu sain a tendance à diminuer sa créativité et donc réduire la complexité de ses mouvements lorsque son partenaire éprouve des difficultés à le suivre (i.e., à se coordonner avec lui dans la condition Bi-Av). Un compromis optimal entre la créativité et la qualité de l'interaction semble avoir été trouvé par ces sujets sains afin de

maintenir une interaction réussie. À l'inverse, les personnes souffrant de schizophrénie ne modifient pas leurs mouvements en fonction de l'interaction. Ils maintiennent leur créativité à un niveau de base (i.e., Uni-Ct et Uni-Av), sans trouver un compromis entre ce niveau de créativité et la qualité de l'interaction.

Pris ensemble, ces résultats peuvent expliquer une partie du déficit d'interaction sociale présent dans la schizophrénie : (i) cette pathologie entraîne une plus faible créativité et (ii) induit une réduction des capacités d'adaptation dans l'interaction. Ces résultats sont à prendre en compte avec la présence d'un *syndrome d'hypofrontalité* chez les personnes souffrant de schizophrénie (Andreasen et al., 1992; Glahn et al., 2005). Ce syndrome entraîne une moindre activation du lobe frontal en présence de schizophrénie. Or, nous avons vu précédemment que le cortex frontal était principalement impliqué durant une tâche d'improvisation où la créativité était engagée (e.g., Beaty, 2015; Limb & Braun, 2008). Ainsi, nos résultats semblent refléter ce syndrome d'hypofrontalité illustré par une plus faible créativité chez les personnes souffrant de schizophrénie. De plus, ce syndrome d'hypofrontalité serait également responsable de la présence de troubles perceptivo-moteurs, tels que des déficits attentionnels et visuo-moteurs (Andreasen et al., 1992; Chen et al., 1999; McGhie & Chapman, 1961; Orzack & Kornetsky, 1966). Dans notre étude, ces déficits perceptivo-moteurs pourraient expliquer l'absence d'adaptation des mouvements des patients à l'interaction, contrairement aux sujets sains. En effet, les individus souffrant de schizophrénie pourraient avoir plus de difficulté à percevoir la qualité de l'interaction (i.e., la coordination réalisée par le partenaire virtuel) et/ou à adapter leur propre comportement en fonction de l'interaction, conduisant ainsi à un déficit d'interaction social.

Néanmoins, alors que nous nous attendions à un déficit de coordination entre le patient et le partenaire virtuel, nous n'avons pas observé de différence entre nos groupes contrôle et expérimental. L'absence de déficit sur la coordination est quelque peu surprenante au regard de la littérature. En effet, Varlet et collègues (2012) ont montré que la coordination intentionnelle était altérée avec la schizophrénie. La présence de troubles perceptivo-moteurs, précédemment décrits, pourrait expliquer ce résultat. Le déficit attentionnel ou le ralentissement de la transmission de l'information seraient, d'après ces auteurs, responsables de ce trouble de coordination. Dans notre étude, bien que nous ayons observé une différence numérique entre les deux groupes, cette différence n'était pas significative. Nous pensons que l'absence de différence entre nos

deux groupes provient des mouvements produits par le partenaire virtuel. En effet, les mouvements produits par l'avatar, lorsque celui-ci mène l'interaction (i.e., essais Suiveur), sont trop lents et d'une amplitude trop petite facilitant ainsi la coordination du participant¹⁹ (effet plancher de nos résultats). Lorsque les mouvements du partenaire sont rapides et d'une amplitude plus grande, les effets des troubles perceptivo-moteurs peuvent être majorés rendant difficile la coordination. A l'inverse, lorsque les mouvements du partenaire sont lents et de petite amplitude, leurs effets sont minimisés favorisant la coordination, et expliquant l'absence de différences entre nos deux groupes dans cette expérience. De surcroît, un effet Condition a été observé sur la coordination indiquant que l'ensemble de notre population (i.e., groupes contrôle et expérimental) se coordonnait plus précisément dans la condition Pro-sociale que dans la condition Anti-sociale. Dans cette dernière condition, les mouvements de l'avatar étaient perturbés par l'ajout d'un composant haute fréquence aux alentours de 2.5 Hz. L'ajout de cette perturbation a ainsi diminué la capacité des sujets à se coordonner avec ces mouvements multi-fréquentiels. La présence de ce composant haute fréquence a pu nécessiter une attention plus importante des sujets, aussi bien du groupe contrôle que du groupe expérimental, réduisant la coordination.

Finalement, ce chapitre démontre que l'investigation des capacités d'improvisation des personnes souffrant de schizophrénie est pertinente. En effet, contrairement aux paradigmes classiquement utilisés permettant d'évaluer le comportement moteur schizophrénique, ce paradigme de jeu en miroir quantifie objectivement et conjointement, deux composantes pertinentes dans le cadre des interactions sociales. Nos résultats indiquent par ailleurs que les capacités d'improvisation permettent également de rendre compte des interactions sociales, mais aussi de leur déficit, justifiant encore un peu plus l'intérêt de ce type de tâche. Pour conclure, nous avons pu mettre en exergue, dans ce chapitre, le déficit d'improvisation socio-motrice en présence de la schizophrénie. Il semblerait, plus précisément, que la créativité motrice soit le paramètre le plus impacté par cette pathologie. Nos résultats indiquent finalement que l'adaptation du comportement moteur durant l'interaction est bien observée chez les sujets sains, favorisant ainsi l'interaction. A l'inverse, les

¹⁹ La vitesse moyenne des mouvements du Meneur lorsque l'avatar mène l'interaction est de 12 cm.sec⁻¹ et son amplitude maximale de 35 cm (i.e., essais Suiveur). Lorsque le participant mène l'interaction (i.e., essais Meneur), la vitesse moyenne est de 24 cm.sec⁻¹ et l'amplitude de 85 cm.

personnes souffrant de schizophrénie ne semblent pas adapter leur comportement, entraînant des interactions sociales plus délicates et moins efficaces. Bien que notre protocole n'ait pu nous permettre de révéler une différence significative de coordination entre nos deux groupes, nous pensons cependant que la coordination interpersonnelle est, elle aussi, perturbée par la présence de la schizophrénie. Pris ensemble, ces résultats semblent être expliqués par la présence de troubles dans la relation perception-action chez des personnes atteintes de la schizophrénie.

Résumé

L'objectif de ce chapitre était d'explorer les capacités d'improvisation socio-motrice sous l'effet d'une pathologie sociale, telle que la schizophrénie.

Nos résultats indiquent que ces capacités, et notamment la créativité motrice, sont altérées chez les individus souffrant de schizophrénie illustrées par une production de mouvements moins variés et moins riches. De plus, les patients n'adaptent pas leurs comportements en fonction de l'interaction. Leur créativité motrice reste au même niveau, quelque soit la condition expérimentale. La présence de troubles perceptivo-moteurs, tel qu'un déficit attentionnel, pourrait expliquer ces différents effets.

Finalement, ce chapitre a aussi permis de montrer que tout individu possède des capacités d'improvisation pouvant rendre compte de leurs possibilités d'interaction sociale. Elles prennent d'ailleurs en compte l'état mental des individus puisque les individus souffrant de schizophrénie possèdent de plus faibles capacités d'improvisation que les sujets sains.

Chapitre 6

Discussion générale

L'objectif général de ce travail de thèse était centré sur l'improvisation socio-motrice. Plusieurs constats et interrogations ont été soulevés dans la littérature, suggérant que les situations d'improvisation socio-motrice pourraient être un moyen adéquat pour rendre compte de la complexité des comportements moteurs lors d'interactions sociales. Appréhender ces réponses comportementales consiste à comprendre les facultés des individus à improviser. Les capacités d'improvisation d'une personne reflètent sa faculté à interagir avec autrui en adaptant ses réponses comportementales à l'autre, et plus généralement à la situation. La communication non-verbale impliquée est ainsi primordiale pour réussir à interagir avec autrui, à l'image de la créativité motrice et de la coordination interpersonnelle. L'approche dynamique des patrons de coordination interpersonnelle s'est focalisée sur la seule analyse de la coordination entre les mouvements de plusieurs personnes, sans prendre en compte la variété de ces mouvements produits durant l'interaction (i.e., la créativité motrice). Les participants devaient, dans ces précédentes études, produire ensemble des mouvements d'oscillations à fréquence et amplitude fixes. Afin de rendre compte de la globalité des comportements moteurs lors d'interactions sociales, nous avons étudié une situation dans laquelle l'évaluation conjointe de la créativité et de la coordination entre les mouvements de deux personnes était possible. Pour cela, nous avons utilisé le paradigme du jeu en miroir, dans lequel les sujets debout l'un en face de l'autre, avaient pour instruction de créer des mouvements complexes, variés et intéressants, tout en restant coordonnés.

Durant ce travail, nous nous sommes, tout d'abord, attachés à recueillir et définir différentes méthodes permettant d'explorer l'ensemble de ces paramètres de l'improvisation (Chapitre 2). Nous avons ensuite exploré le comportement moteur de sujets novices en improvisation, dans le but d'évaluer leurs capacités d'improvisation et les mécanismes sous-tendant leur acquisition (Chapitre 3). Puis, l'influence de l'improvisation sur le comportement moteur intra-personnel, à travers l'organisation posturale, a été investiguée dans le Chapitre 4. Enfin, nous avons étudié les conséquences de la pathologie schizophrénique, pour laquelle un déficit d'interaction sociale est reconnu, sur les capacités d'improvisation (Chapitre 5). Basés sur l'ensemble de ces résultats, quatre principaux axes de discussion sont à présent détaillés.

1. Méthodes et outils d'analyse

Une contribution importante de ce travail de thèse a été le recueil et le développement d'outils permettant d'investiguer, d'une part, la créativité de signaux multi-fréquentiels et d'amplitudes variables, et d'autre part, la synchronisation entre ces signaux. Compte tenu des propriétés non-stationnaires et plurifréquentielles des séries temporelles obtenues dans nos différents chapitres expérimentaux, les méthodes couramment utilisées au sein de l'approche dynamique n'ont pu être appliquées. Ce travail méthodologique a permis de mettre en lumière les limites méthodologiques des outils permettant d'investiguer les interactions sociales vues sous l'angle moteur.

Concernant la créativité, une analyse subjective a plusieurs fois été utilisée au sein d'une approche plus psychologique des interactions sociales. Dans le contrôle moteur, peu d'études se sont intéressées à la créativité motrice. Nous avons néanmoins recensé et proposé plusieurs variables permettant de rendre compte de cette créativité (Chapitre 2). L'utilisation de la transformée en ondelettes paraît tout à fait pertinente pour discriminer des signaux en fonction de leur variété et de leur complexité. En effet, cette transformée contribue à saisir localement les caractéristiques des signaux en fonction des fréquences et du temps. Elle permet de témoigner visuellement et qualitativement du contenu fréquentiel du signal et ainsi de rendre compte de la complexité, donc de la créativité motrice. Il est également possible de quantifier cette complexité à l'aide de la somme du spectre de puissance ou du pourcentage de spectre significatif. Bien que ces mesures ne soient pas optimales puisqu'elles nécessitent de déterminer empiriquement certains paramètres comme la fenêtre de fréquences choisie, elles semblent être les plus adaptées pour évaluer quantitativement la créativité d'un mouvement. À l'instar de l'index de complexité (Noy et al., 2011), la somme du spectre de puissance permet de comparer objectivement la créativité de populations différentes, telles que des sujets sains novices et experts en improvisation ou des personnes souffrant de schizophrénie (Chapitres 3 et 5). Les résultats obtenus ont, par ailleurs, été confirmés par une analyse visuelle des séries temporelles, validant la pertinence de ces variables pour évaluer la créativité motrice. Toutefois, il semble important de noter que ces méthodes ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble de la créativité motrice. Elles n'en représentent qu'une analyse globale à travers la complexité et la variété des fréquences présentes dans le signal. La créativité motrice peut aussi être observée à niveau plus local en regardant l'organisation même de la

structure du mouvement. Certains auteurs en robotique et en sciences du mouvement humain considèrent les mouvements comme une concaténation de primitives, c'est-à-dire de mouvements de bases, de références tels que les mouvements discrets ou continus (Flash & Hochner, 2005). Au regard de la littérature et de nos résultats, nous pouvons par exemple émettre l'hypothèse que des personnes souffrant de schizophrénie possèdent plus de régularités dans l'agencement des primitives qu'un sujet contrôle (Baek et al., 2013; Chan et al., 2011). Néanmoins, les méthodes et outils ne permettent pas à l'heure actuelle de capturer ce type de créativité. Il paraît ainsi fondamental de poursuivre le développement de méthodes plus à même d'étudier la créativité dans son intégralité.

Compte tenu de la complexité des signaux, l'analyse classique de la coordination n'est plus adaptée. Au sein de l'approche dynamique des coordinations dans laquelle ce travail de thèse s'inscrit, la coordination est très souvent mesurée à l'aide de la phase relative. Cependant, cette variable, bien qu'intéressante, n'est pas adaptée en l'état à ce type de signaux. Même si la phase relative, basée sur l'analyse en ondelettes croisées, permet de mieux appréhender la non-stationnarité des séries temporelles que celle basée sur la transformée de Hilbert, elle ne représente pas une solution optimale (cf. Chapitre 2. 2. 1. 2.). Issartel et collaborateurs (2007) ont justement utilisé la phase relative obtenue avec la transformée en ondelettes croisées. Alors que les sujets devaient intentionnellement coordonner leurs mouvements complexes, le patron de coordination en phase ne représentait qu'un peu plus de 10% de la distribution d'occurrences de la phase relative (comprise entre 0 et 180°). Ces résultats, expliqués en partie par la vision périphérique utilisée par les sujets pour se coordonner, restent tout de même faibles au regard des valeurs observées dans la littérature pour une tâche de coordination intentionnelle (Richardson et al., 2007; Schmidt et al., 2007). À l'inverse, la différence temporelle (dT) ou l'erreur de position relative (EPR), utilisées respectivement dans la Chapitre 3 et 5, semblent, elles, plus adaptées afin de rendre compte de cette synchronisation. Toutes deux présentent néanmoins des limites. La dT ne mesure que les différences temporelles aux points de rebroussement, et ne constitue pas une mesure continue de la coordination : elle représente plutôt une analyse discrète. Ceci peut avoir pour conséquence de ne pas prendre en compte toutes les informations contenues dans le signal. De son côté, l'EPR est une mesure continue de la coordination mais nécessite une condition où un meneur est pré-désigné. Elle ne peut donc pas s'adapter à l'ensemble des conditions expérimentales. À l'heure où l'artificialité des paradigmes

expérimentaux est remise en cause, il est essentiel de résoudre ces problèmes d'analyse et de poursuivre ce développement méthodologique. Une homogénéisation des outils de mesures utilisés et la recherche d'une variable collective, telle que la phase relative, semblent être nécessaires dans la poursuite de ces travaux.

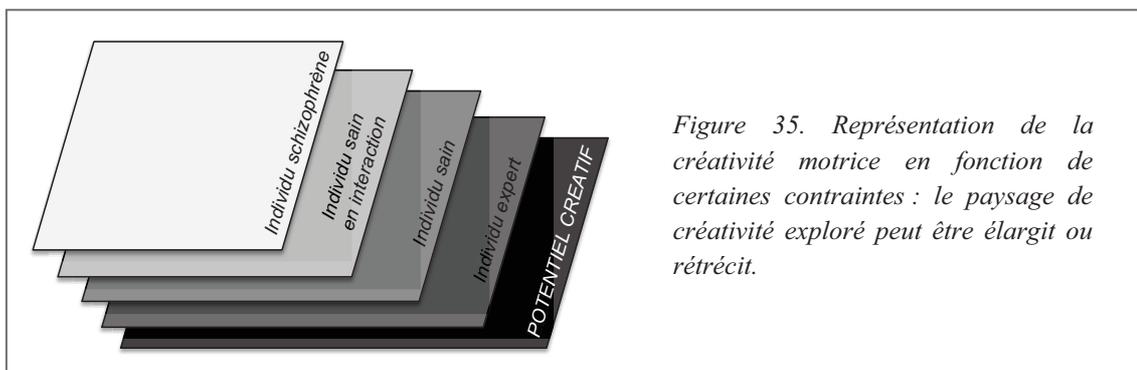
2. Conceptualisation de l'improvisation

Les limites soulevées au niveau méthodologique se retrouvent également au niveau conceptuel. Au sein de l'approche des patrons dynamiques des coordinations dans laquelle ce travail de thèse s'inscrit (e.g., Kelso, 1995), la coordination apparaît comme auto-organisée et fonction de contraintes liées à l'individu, à la tâche et à l'environnement (Newell, 1985). Les coordinations motrices humaines ont majoritairement été formalisées et prédites à l'aide du modèle HKB (Haken et al., 1985). Un système, dans lequel émerge la coordination entre deux personnes, est composé de deux oscillateurs couplés. Bien que ce modèle ait permis de mieux appréhender et prédire les comportements observés, il n'en reste pas moins limité en l'état. En effet, les propriétés de ces oscillateurs imposent un mouvement pendulaire et rythmique, donnant des signaux à fréquence et amplitude fixes. Ainsi, sa validité a essentiellement été démontrée pour des situations de laboratoire dans lesquelles les mouvements correspondent à des oscillations périodiques.

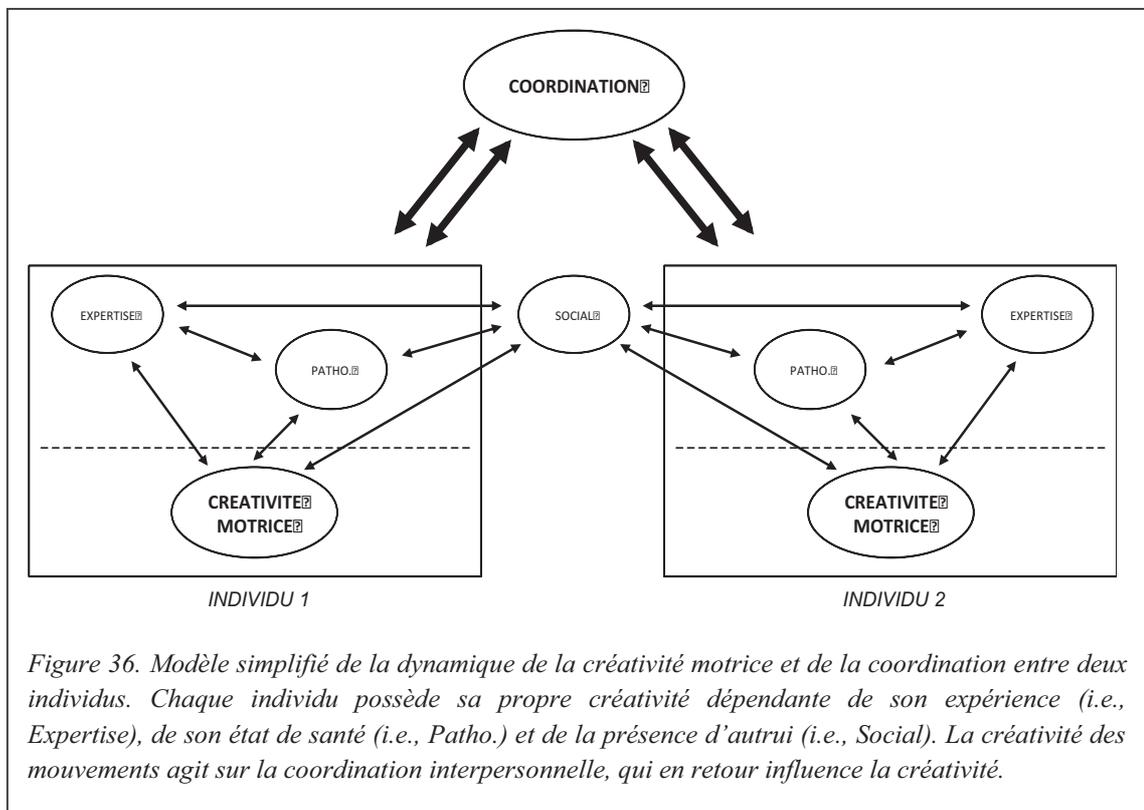
L'utilisation d'une tâche d'improvisation, telle que la nôtre, a notamment permis d'explorer la coordination entre des mouvements plus complexes différents de simples oscillations périodiques. Bien que nous n'ayons pas mesuré la coordination à l'aide de la phase relative, les délais temporels constatés ainsi qu'une inspection visuelle des signaux suggèrent un patron de coordination proche de la phase entre les mouvements des deux individus (cf. Figure 20., Chapitre 3.). Ces résultats vont dans le sens de ceux observés par Issartel et collaborateurs (2006a). Néanmoins, et même si d'autres modèles ont été proposés pour décrire le comportement d'un système pour des mouvements discrets, il reste, à l'heure actuelle, difficile de formaliser et de prédire ces résultats, et en particulier avec le modèle HKB tel qu'il est (cf. Huys, Studenka, Rheaume, Zelaznik, & Jirsa, 2008). La place de la créativité des mouvements produits par les oscillateurs n'est ainsi ni prise en compte ni intégrée dans cette approche dynamique des

coordinations. Quelle est la place de la créativité et comment peut-elle être incorporée dans cette approche ?

Nous considérons la créativité comme émergente en fonction de contraintes apposées au sujet (Newell, 1985; Sawyer, 2003, 2006). Au cours de pré-tests réalisés dans ce travail, nous avons observé que la présence d'une personne avec laquelle interagir modifie la créativité de chacun. En effet, lorsqu'un individu n'interagit avec personne, ses mouvements sont plus créatifs et complexes que lorsqu'il se coordonne avec autrui (i.e., contrainte liée à la tâche). Les résultats du Chapitre 5 indiquent également qu'une interaction de moindre qualité (manipulée à l'aide de la capacité de synchronisation du partenaire virtuel) entraîne une diminution de la créativité des mouvements du participant sain. En présence de pathologie schizophrénique (i.e., contrainte liée à l'individu), la créativité est cependant perturbée. L'expertise en improvisation, semble au contraire améliorer la créativité motrice des individus (e.g., Noy et al., 2011). La figure 35 résume notre pensée. Tout individu possède un potentiel créatif (Maslow, 1954), que nous illustrons dans la figure par un *paysage de créativité*. Ce paysage de créativité n'est que partiellement exploité par chacun. En fonction des différentes contraintes environnantes, le paysage de créativité exploré est plus ou moins grand. Par exemple, lorsqu'une personne interagit avec une autre, la créativité impliquée est alors plus restreinte. Le paysage exploré par l'expert est également plus large que celui de l'individu novice. À l'inverse, le patient souffrant de schizophrénie explore un paysage de créativité plus petit du fait de la pathologie. Finalement, ce cadre interprétatif laisse suggérer qu'une augmentation du paysage de créativité exploré semble possible, et ce, en fonction de son paysage initial, à l'image de la coordination bi-manuelle (Zanone & Kelso, 1992 ; Zanone & Kostrubiec, 2004 ; Zanone et al., 2010).

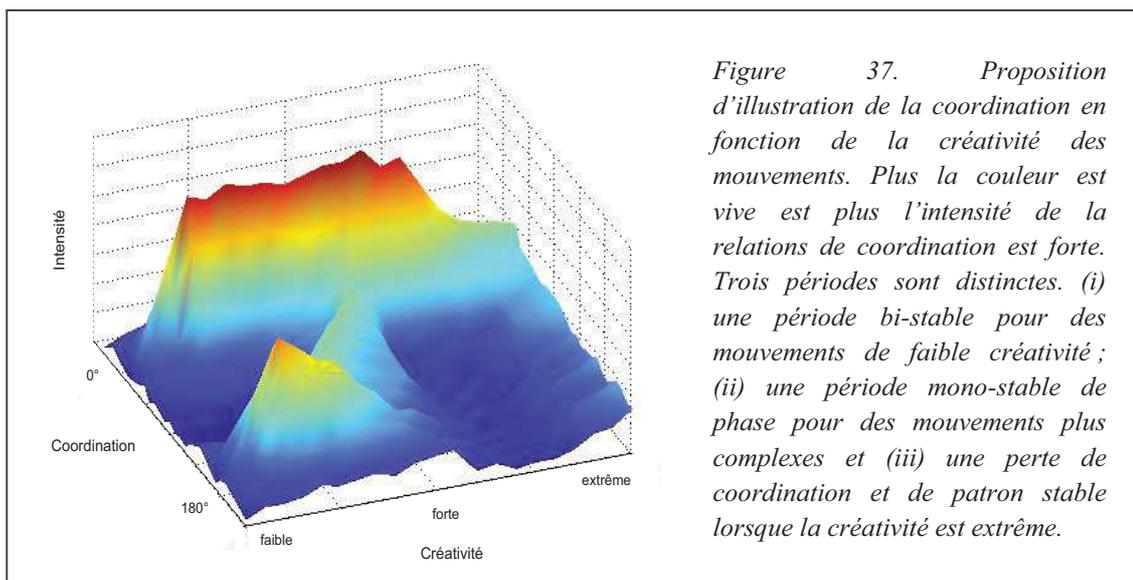


Ainsi, la créativité peut être perçue comme propre à chaque individu (dépendante de son expérience et de son vécu). D’après le modèle HKB décrit précédemment, chaque oscillateur possède ses propres caractéristiques, appelées propriétés intrinsèques, comme la fréquence ou l’amplitude des mouvements. Nous envisageons ici la créativité comme une propriété intrinsèque de chaque oscillateur modulant leurs mouvements et leurs interactions. À l’instar de la fréquence et de l’amplitude des mouvements de chaque oscillateur, la créativité motrice semble influencer la coordination entre ces deux oscillateurs (Kelso et al., 1990; Lopresti-Goodman, Richardson, Silva, & Schmidt, 2008; Slowinski et al., 2016; Varlet et al., 2012). Lors de travaux réalisés au cours de cette thèse mais non détaillés entièrement dans ce manuscrit, il a été montré qu’une similarité au niveau de la distribution de vitesses des mouvements improvisés par deux personnes entraînait une meilleure coordination (Slowinski et al., 2016). En d’autres mots, plus les personnes possèdent une créativité proche l’une de l’autre et meilleure est la coordination entre leurs mouvements improvisés. Un modèle simplifié de l’improvisation intentionnelle basé sur ce travail est représenté Figure 36.



Ce modèle résume la dynamique de l'improvisation, à travers la créativité et la coordination entre deux individus. Chaque rectangle correspond à un oscillateur (individu), possédant sa propre créativité. Cette créativité émerge de l'interaction de différentes contraintes comme l'expertise, l'état de santé et la présence d'autrui. La présence d'une seconde personne amène un couplage entre les deux individus, entraînant une coordination qui, en retour, module la créativité.

Finalement, la créativité semble également influencer la dynamique de coordination interpersonnelle dans une situation d'improvisation socio-motrice. La figure 37 illustre cette dynamique de coordination. En abscisse, nous retrouvons la créativité et en ordonnée, la coordination avec les patrons stables reconnus dans la littérature. La couleur témoigne de l'intensité de la relation de coordination. Bien que nous n'ayons pas mesuré la coordination à travers la phase relative, nous pensons toutefois que la coordination émerge en deux états stables (en phase et antiphase) lorsque la créativité des mouvements est faible (comme des mouvements oscillatoires à amplitude et fréquence fixe ; e.g., Schmidt & Richardson, 2008). Le modèle HKB illustre parfaitement ce phénomène. À l'instar de l'augmentation de la fréquence de mouvements, lorsque les mouvements deviennent plus complexes (i.e., créativité motrice augmentée), la coordination en phase reste alors l'unique patron de coordination possible, puisqu'étant le plus stable des deux. Lorsque la créativité est trop élevée et dépasse un certain seuil, la coordination diminue²⁰.



²⁰ L'ensemble de ces prédictions est attendu pour un individu sain.

Toutefois, cette conception de l'improvisation semble convenir à une situation de jeu en miroir où il est demandé explicitement aux participants de coordonner leurs mouvements. Il serait intéressant de vérifier d'une part si ces prédictions se confirment dans une situation intentionnelle, et d'autre part, si elles peuvent être observées dans une tâche d'improvisation où la coordination est cette fois-ci non-intentionnelle (i.e., sans demander explicitement aux individus de se coordonner). Nous pensons que l'expertise en improvisation pourrait également modifier cette dynamique de coordination. Par exemple, nous pouvons faire l'hypothèse qu'elle (i) favorise la stabilité des patrons de coordination existants pour des mouvements complexes, en repoussant notamment la transition de la bi-stabilité vers la mono-stabilité, et/ou (ii) promeut l'essor de nouvelles relations de coordinations à 90 ou 130°, à l'instar de celles observées après une phase d'apprentissage de la coordination bi-manuelle ou interpersonnelle (Zanone & Kelso, 1992 ; Kostrubiec et al., 2015).

3. Interactions sociales et communication non-verbale

Ce travail de thèse permet, à notre sens, de se rapprocher des interactions sociales quotidiennes dans lesquelles les mouvements sont plus complexes à l'image de situations d'improvisation. Par exemple, nous avons montré que les capacités d'improvisation socio-motrice, en plus de pouvoir être améliorées, permettent de discriminer les individus sains de personnes souffrant de schizophrénie ou d'experts en improvisation (Noy et al., 2011). Le modèle pathologique utilisé a également permis de renforcer un peu plus cette proposition, en démontrant que le déficit d'interaction sociale reconnu pour les personnes souffrant de schizophrénie se retrouve aussi dans leurs capacités d'improvisation. Finalement, les mouvements complexes observés dans cette situation permettent de généraliser plus facilement les résultats obtenus à des situations d'interactions non-verbales plus proches de la vie quotidienne.

Deux conditions d'interactions dyadiques ont été testées : celle où un meneur est pré-désigné (Meneur-Suiveur ou MS) et celle où, au contraire, l'interaction émerge sans aucun rôle prédéfini (Improvisation Jointe ou IJ, respectivement). Ces deux situations permettent d'englober l'ensemble des interactions possibles. Prenons l'exemple MS. Cette situation peut intervenir lorsque deux individus déplacent ensemble un meuble imposant : la personne située devant dirige et mène l'interaction alors que celle placée

derrière suit les déplacements de son partenaire. Néanmoins, si le meneur ne prend pas en compte le suiveur, un accident peut se produire. À l'inverse, la condition IJ peut s'apparenter à une situation où deux amis marchent l'un à côté de l'autre. Dans cette situation, il n'y a pas de rôles prédéfinis. À certains moments, l'un des individus est le meneur, l'autre le suiveur et à d'autres instants, les rôles s'inversent : le premier devient le suiveur et le second le meneur. Les deux individus doivent toutefois porter attention aux comportements de l'autre afin de continuer à marcher ensemble dans la même direction. Nous pensons que nos résultats illustrent ces différentes interactions, tout en renforçant l'existence d'une communication non-verbale qui semble s'améliorer au fur et à mesure de l'interaction. En effet, nous avons montré que les capacités d'improvisation peuvent être améliorées (Chapitre 3). Plusieurs auteurs ont suggéré que la sensibilité aux mouvements de l'autre était fonction de l'expérience passée à visualiser et produire ces actions (Jacobs, Pinto, & Shiffrar, 2004). Elle serait également favorisée par la synchronisation entre les individus (Valdesolo et al., 2010), pouvant expliquer nos résultats. Un parallèle peut être fait entre la dynamique d'interaction dans notre situation expérimentale et celle des interactions sociales quotidiennes. Lorsque deux individus se rencontrent et interagissent pour la première fois, leur interaction n'est pas des plus efficaces, pouvant entraîner des gestes peu adaptés et peu synchronisés. À force de se côtoyer et d'interagir, les personnes se synchronisent spontanément et deviennent plus sensibles aux comportements de l'autre : l'interaction devient alors plus aboutie et fluide (Bernieri, 1988 ; Schmidt & Lee, 1988). Dans ce contexte, la coordination spontanée émergente dans les interactions pourrait par exemple favoriser la production de mouvements riches et créatifs afin d'améliorer l'interaction dans sa globalité.

Une étude récente illustre encore un peu plus l'intérêt et la validité des situations d'improvisation. En effet, il a été montré que la performance d'improvisation dans le jeu en miroir était reliée à la capacité d'*attachement* des participants (Feniger-Schaal et al., 2016). L'*attachement* réfère au lien qui unit deux personnes, et témoigne des interactions sociales (Ainsworth, Blehar, Waters, & Wall, 1978). Un *attachement « secure »* rend compte d'une aisance sociale pour se rapprocher des autres (Hazan & Shaver, 1987; Waters & Cummings, 2000). À l'inverse, un *attachement « insecure »* illustre une difficulté de se rapprocher des gens. Feniger-Schaal et son équipe ont montré que les personnes ayant une aisance sociale se permettaient plus de liberté dans le jeu en miroir sans pour autant négliger l'autre. En d'autres mots, ces personnes là

produisaient des mouvements plus créatifs, tout en maintenant un bon niveau de synchronisation. Ces résultats laissent suggérer un lien entre les capacités d'improvisation des individus et leur aisance sociale. Il est possible d'imaginer des experts en improvisation posséder de meilleures capacités d'improvisation et donc une plus grande aisance sociale que les novices, confirmant l'influence de pratiques créatives, telles que la danse, sur les interactions sociales (Lobo & Winsler, 2006). Inversement, il a été montré que des personnes souffrant de schizophrénie possèdent en majorité un attachement « insecure », entraînant de plus faibles capacités d'improvisation (Berry, Barrowclough, & Wearden, 2007; Mickelson, Kessler, & Shaver, 1997). Bien qu'un lien direct n'ait pas été complètement démontré, les capacités d'improvisation socio-motrice pourraient permettre de discriminer des personnes « pro-sociales » (i.e., les experts) de personnes en situation de déficit social (i.e., en présence de schizophrénie).

Les interactions sociales ne reposent pas simplement sur le comportement interpersonnel. La posture joue également un rôle prépondérant dans leurs succès en sous-tendant par exemple les mouvements produits durant les interactions sociales. Elle n'avait été jusqu'alors évaluée que dans des tâches de laboratoire assez artificielles, rendant difficile leur interprétation dans un contexte plus écologique. La majorité des études portaient en effet sur une tâche de poursuite de cible avec la tête (Bardy et al., 1999, 2002; Marin et al., 1999; Oullier et al., 2006). Même si notre paradigme n'est pas optimal, l'utilisation de l'improvisation s'inscrit, notamment, dans une logique d'exploration de la dynamique de coordination posturale. Nos résultats démontrent ainsi que l'improvisation socio-motrice renforce la stabilité posturale. Plus spécifiquement, alors que la créativité motrice diminue la stabilité posturale, la coordination entre les mouvements improvisés améliore cette stabilité. Ces résultats peuvent être regardés au travers de la pathologie schizophrénique. En effet, nous avons observé que (i) la créativité perturbait la stabilité posturale et que (ii) les personnes souffrant de schizophrénie présentaient une plus faible créativité. Plusieurs auteurs ont indiqué la présence de troubles dans l'équilibre postural de patients, induisant une moindre stabilité posturale qu'observée chez les sujets sains (Marvel, Schwartz, & Rosse, 2004). Il se pourrait ainsi que le potentiel de créativité exploré des patients soit restreint en raison de contraintes d'équilibre : afin de maintenir un équilibre plus précaire, la créativité motrice est diminuée.

Ces résultats peuvent également faire écho à certains comportements observés dans le domaine de l'art et du sport. Prenons par exemple la danse. La danse est l'une des disciplines où la créativité et la coordination s'expriment au mieux. La stabilité posturale est néanmoins préservée dans un but de maintien d'équilibre et de support pour les différents mouvements réalisés. Afin de renforcer cette stabilité posturale, il pourrait être conseillé aux danseurs de réaliser les mouvements les plus créatifs de manière coordonnée avec un autre danseur. Cependant, cela pourrait se limiter à des danseurs novices, ou en cours d'apprentissage. En effet, certains travaux indiquent que la pratique de la danse influence le contrôle postural. Les danseurs, contrairement aux non-danseurs, sont ainsi plus enclins à maintenir une stabilité posturale, même pour une tâche de poursuite de cible complexe (Kiefer et al., 2011). Ces résultats laissent à penser que l'expertise en danse améliore également la stabilité posturale et diminue l'influence de la complexité des mouvements sur la posture, permettant la production de mouvements plus riches et complexes que des sujets novices. Ainsi, les experts en danse pourraient ne pas être influencés par la créativité motrice, contrairement aux sujets novices, comme observé dans ce travail de thèse.

Finalement, ce travail de thèse offre un cadre nouveau permettant l'interprétation des performances sportives dans des sports comme le football. Un match de football n'est jamais écrit à l'avance, mais dépend des comportements des joueurs et de leurs adversaires. Au-delà des dimensions stratégiques (le choix des placements des joueurs), tactiques (le choix des actions d'un joueur), techniques (la réalisation du choix) et physiques (les ressources disponibles pour réaliser l'action), la faculté des joueurs à improviser et à adapter leurs comportements moteurs en fonction de leur environnement est primordiale dans leur performance et dans le succès du match. Il faut savoir quand dribbler ou faire la passe, quand tacler ou reculer pour intercepter etc. Ces réponses comportementales, que l'on peut associer plus généralement à la créativité des individus, reposent sur les comportements des coéquipiers et des adversaires. Les joueurs doivent ainsi créer leur propre comportement tout en se coordonnant avec autrui (Bourbousson, Seve, & McGarry, 2010). On peut alors imaginer que ce qui différencie un « génie du ballon rond » comme Zidane ou Pelé d'un « joueur du dimanche » est leur capacité à improviser. Dans un contexte d'entraînement, il serait possible d'imaginer des tâches de coordination entre de jeunes coéquipiers, permettant d'une part d'améliorer les comportements pro-sociaux (van Baaren et al., 2004), et d'autre part,

leur créativité, et plus généralement leur faculté à improviser. Cette hypothèse repose sur notre conception selon laquelle la créativité correspond à la possibilité d'accès à des solutions stables, riches et variées en réponse aux contraintes liées au sujet, la tâche et l'environnement (Newell, 1985, 1986). Bien qu'il ne s'agisse ici que d'une hypothèse, la question reste ouverte et nécessite de futures expérimentations pour y répondre.

4. Pathologie et réhabilitation

Une dernière contribution de ce travail de thèse porte (i) sur la compréhension de la pathologie schizophrénique et (ii) sur de nouvelles voies de réhabilitation. La pathologie schizophrénique est connue pour entraîner des déficits d'interaction sociale, ayant pour origine un trouble de la communication non-verbale (Lavelle et al., 2013). L'utilisation de tâches d'improvisation a permis de mettre en exergue ce trouble de la communication non-verbale. Plus spécifiquement, nos résultats indiquent une créativité moins exprimée chez les personnes souffrant de schizophrénie, mais également une absence d'adaptation de leurs mouvements en fonction de l'interaction. Bien que la coordination n'ait pas été impactée chez les personnes souffrant de schizophrénie (i.e., voir Chapitre 5.), ces résultats montrent que les capacités d'improvisation des personnes souffrant de schizophrénie sont perturbées. Ils permettent ainsi d'illustrer le déficit d'interaction sociale présent pour cette maladie mentale. De plus, ils étendent les précédents travaux en quantifiant objectivement un déficit de créativité motrice, mais aussi une absence d'adaptation de leur comportement en fonction de l'interaction et du partenaire. Ces moindres capacités pourraient correspondre à un nouveau marqueur de la pathologie schizophrénique, permettant, entre autres, un diagnostic rapide de la maladie. Il serait intéressant de corrélérer ces résultats à des échelles et questionnaires, évaluant l'état d'avancement de la pathologie ou de la symptomatologie. Par exemple, un patient souffrant d'un stade plus avancé de schizophrénie, avec des symptômes négatifs plus marqués pourrait présenter de plus faibles capacités d'improvisation. Plusieurs études ont retrouvé, dans l'entourage familial de patients, des effets semblables à ceux causés par la schizophrénie au niveau de la créativité artistique et de la coordination (Del-Monte et al., 2013 ; Kyaga et al., 2011). Il n'est ainsi pas exclu que les proches parents de patients possèdent eux aussi des capacités d'improvisation moindre que les membres de familles ne présentant aucun cas de schizophrénie recensé.

Dans un contexte de réhabilitation, l'amélioration des interactions sociales doit être une des priorités. Certains résultats de ce travail de thèse offrent quelques pistes pouvant y contribuer. Nous avons montré que les capacités d'improvisation pouvaient être améliorées en un faible intervalle de temps, suggérant un possible apprentissage comme observé dans le cadre des coordinations motrices (Kostrubiec et al., 2015 ; Zanone & Kelso, 1992 ; Zanone & Kostrubiec, 2004 ; Zanone et al., 2009). Comme nous l'avons vu précédemment, la créativité et la coordination entre les personnes étant toutes deux fondamentales dans le succès des interactions sociales, il semble pertinent d'envisager des protocoles de réhabilitation allant dans ce sens. Premièrement, comment favoriser la créativité motrice ? Nous avons pu observer dans le Chapitre 3 que des tâches de synchronisation non-intentionnelle favorisaient la créativité motrice. Cette coordination spontanée n'étant pas impactée par la présence de la schizophrénie (Varlet et al., 2012), son utilisation dans un cadre thérapeutique semble intéressante. La mise en place de protocole de réhabilitation basé sur des tâches de coordinations non-intentionnelles pourrait ainsi favoriser le développement de la créativité motrice chez des individus souffrant de schizophrénie. Bien que l'hypothèse d'hypofrontalité ait été avancée dans le Chapitre 5 pour justifier une moindre créativité chez les personnes malades, nous pensons toutefois que l'utilisation d'un protocole de réhabilitation de ce type pourrait améliorer le paysage de créativité exploré par les patients (cf. Figure 35.).

Deuxièmement, comment améliorer la coordination interpersonnelle intentionnelle? Plusieurs études ont montré que cette coordination était impactée par la pathologie (Lazerges et al., 2011 ; Varlet et al., 2012). La découverte d'une signature motrice propre à chaque individu, et ce, même au cours de mouvements improvisés, offre plusieurs pistes de réflexion quant aux protocoles de réhabilitation (Slowinski et al., 2016 ; Issartel et al., 2006a). Dans cette étude, nous avons montré que des participants sains ayant des dynamiques de mouvements similaires se coordonnaient d'une manière plus précise que ceux ayant des signatures motrices individuelles différentes (Slowinski et al., 2016). Plusieurs informations sont à extraire ici. Chaque individu sain semble pouvoir être discriminé par rapport aux mouvements improvisés qu'il crée. Il est ainsi légitime de se demander : (i) si cette signature peut également se retrouver en présence de schizophrénie, (ii) et si elle peut également différencier les individus malades entre eux (et entre les différents stades de la pathologie). De surcroît, une signature motrice similaire favorise la coordination entre les individus sains. Si cette signature motrice est retrouvée chez les personnes souffrant de schizophrénie, il

serait alors possible d'améliorer la coordination entre ces personnes et un autre individu possédant des signatures motrices similaires. L'utilisation d'un partenaire virtuel dans lequel cette signature serait implémentée, à l'aide d'une architecture cognitive interactive telle que celle utilisée dans le chapitre 5, pourrait jouer un rôle considérable pour améliorer la coordination de ces personnes malades. Bien évidemment, la similarité de cette signature motrice devra être peu à peu dégradée au fil de la réhabilitation, afin d'obtenir une interaction proche de celles observées dans la vie de tous les jours (c'est-à-dire indépendamment de la signature motrice).

Finalement, alors qu'un déficit d'interaction sociale est reconnu en présence du trouble du spectre autistique et de la phobie sociale, il semble intéressant de le quantifier à travers les capacités d'improvisation (Mundy et al., 1986; Wittchen et al., 2000). Par exemple, cela permettrait de vérifier qu'en plus d'un déficit de coordination interpersonnelle, ces pathologies entraînent également un déficit de créativité motrice, illustrant ainsi de moindres capacités d'improvisation. Une comparaison entre la schizophrénie et ces deux autres pathologies sociales pourrait notamment améliorer la compréhension du déficit d'interaction sociale associé, facilitant la mise en place de protocoles de réhabilitations spécifiques à chaque maladie.

5. Limites et perspectives

Ce travail de thèse ne déroge pas à la règle : comme tout travail expérimental, il possède des limites. Nous en avons dénombré deux principales. L'utilisation de l'improvisation socio-motrice permet de s'affranchir des contraintes apposées aux mouvements et de se rapprocher des situations de la vie quotidienne. Toutefois, enlever des contraintes implique nécessairement un contrôle expérimental moindre mais aussi une plus grande variabilité entre les participants testés. Cette forte variabilité est intrinsèquement liée à la créativité des participants et dépend, comme nous l'avons observé, de l'expérience ou même de l'état mental (Feniger-Schaal et al., 2016). Bien que nos résultats soient conformes à nos hypothèses, une plus grande variabilité au niveau des variables analysées a par exemple pu influencer la significativité de nos résultats, augmentant le risque β de retenir l'hypothèse nulle alors qu'elle était fausse. De plus, dans les Chapitres 3 et 4, nous avons comparé quatre groupes différents nécessitant un effectif suffisamment important, étant donné la faible puissance

statistique d'un plan inter-groupe. Afin d'éviter de recruter à nouveau un nombre de sujets aussi important que celui utilisé dans le Chapitre 3 (i.e., 96), nous avons ainsi opté pour l'utilisation d'un protocole commun permettant l'investigation du comportement inter- et intra-personnel en situation d'improvisation. Au final, environ 200 participants (155 sujets sains et 45 sujets atteints de schizophrénie) ont été testés au cours de ce travail de thèse. Le choix d'un protocole commun nous a amené à faire certaines concessions quant aux manipulations expérimentales réalisées. La forte individualisation de la créativité nous a par exemple conduit à la manipuler de la manière la plus simple possible, à savoir par la manipulation du contenu fréquentiel des mouvements. Cette manipulation peut paraître peu ambitieuse au regard des mouvements créatifs et complexes produits par les participants, pouvant notamment expliquer l'absence d'effet de la créativité sur l'acquisition de l'improvisation dans le Chapitre 3. Néanmoins, notre manipulation de la créativité a influencé la coordination posturale, démontrant une certaine validité de notre protocole expérimental.

Une seconde limite repose tout simplement sur le paradigme choisi. En effet, le jeu en miroir implique une coordination intentionnelle. Cette situation ne permet pas de rendre compte de l'ensemble des interactions sociales quotidiennes, mais illustre celles où deux personnes se coordonnent afin d'augmenter leurs capacités d'actions, dans un but de collaboration (Isenhower, Richardson, Carello, Baron, & Marsh, 2010; Marsh et al., 2009; Richardson et al., 2007). Nous pensons, toutefois, que nos résultats obtenus dans cette situation expérimentale conduisent à une première étape dans l'analyse des interactions sociales globales à travers l'improvisation socio-motrice. De plus, il semble important de souligner que des périodes de non-synchronisation et de désynchronisation sont également nécessaires dans les interactions sociales quotidiennes comme dans les activités d'art. Ainsi, le succès des interactions sociales pourrait également dépendre, dans certaines conditions, des capacités des protagonistes à ne pas se synchroniser. Lorsque deux danseurs ou musiciens improvisent, ils doivent à certains moments réaliser leurs propres mouvements, indépendamment des mouvements de l'autre. A l'instar d'un effet bénéfique de l'expertise en art sur les capacités d'improvisation (et donc sur la coordination), il peut être envisagé un effet bénéfique de l'expertise sur leur capacité à se désynchroniser.

Bien que nous ayons soulevé au fil de ce chapitre différentes perspectives issues de ce travail de thèse, d'autres sont également à mentionner. Il serait par exemple intéressant de coupler nos résultats comportementaux de l'improvisation socio-motrice

avec des résultats neurophysiologiques. Plus précisément, l'exploration des mécanismes cérébraux sous-tendant l'improvisation socio-motrice pourrait apporter une réelle plus-value à ce travail. Cela permettrait, entre autres, de confirmer que la créativité motrice repose sur des processus cérébraux comparables à ceux observés pour la créativité artistique à plusieurs, à savoir une activation du cortex préfrontal (Donnay et al., 2014). Dans une étude préliminaire, nous avons demandé à quatre paires de sujets sains de réaliser la condition Meneur-Suiveur du jeu en miroir. A l'aide de deux spectroscopies proche infra-rouge fonctionnelles (i.e., « fNIRS hyperscanning ») permettant l'enregistrement du débit sanguin cérébral²¹ de chaque participant, nous avons pu observer qu'un réseau impliquant l'activation du cortex préfrontal est beaucoup plus sollicité pour le meneur que pour le suiveur (Figure 38.).

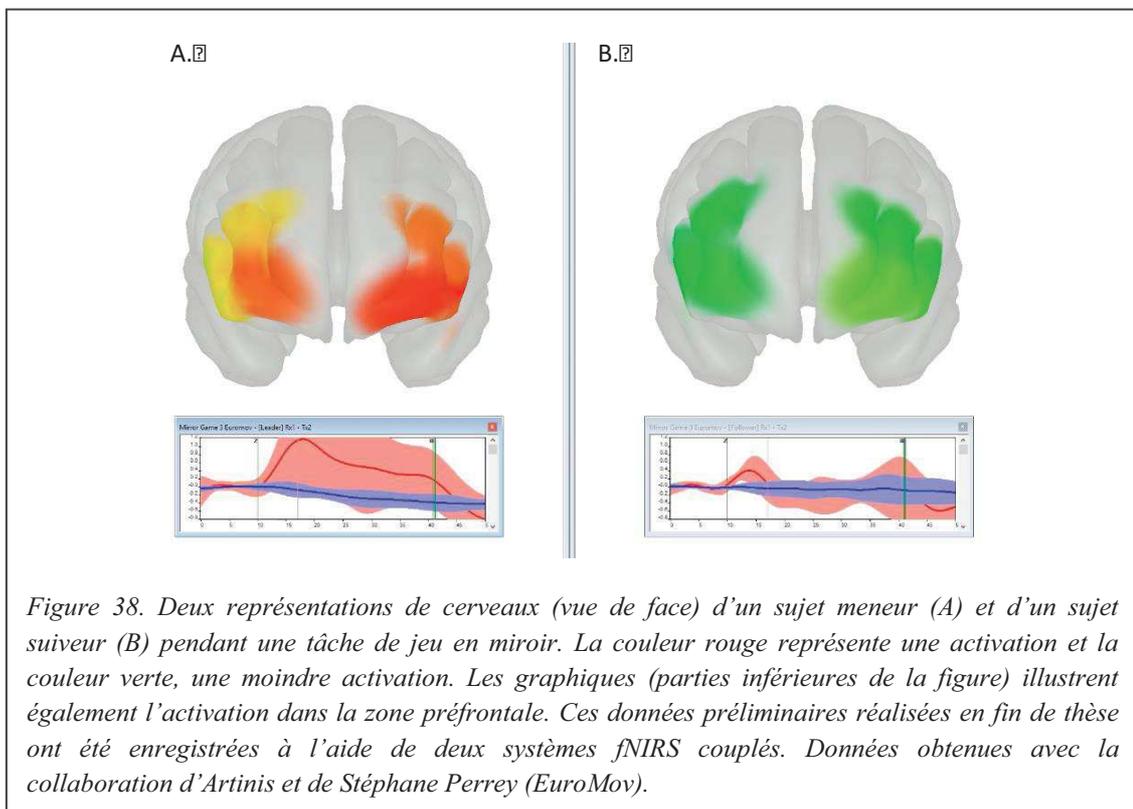


Figure 38. Deux représentations de cerveaux (vue de face) d'un sujet meneur (A) et d'un sujet suiveur (B) pendant une tâche de jeu en miroir. La couleur rouge représente une activation et la couleur verte, une moindre activation. Les graphiques (parties inférieures de la figure) illustrent également l'activation dans la zone préfrontale. Ces données préliminaires réalisées en fin de thèse ont été enregistrées à l'aide de deux systèmes fNIRS couplés. Données obtenues avec la collaboration d'Artinis et de Stéphane Perrey (EuroMov).

Ces premiers résultats sont bien évidemment à confirmer, mais semblent, en tout cas, aller dans le sens des hypothèses formulées et de la littérature (Konvalinka et al., 2014). De plus, l'identification de signatures neuronales du meneur et du suiveur, voire même de l'expert en improvisation, pourrait apporter une réelle

²¹ Une augmentation du débit sanguin illustre ici une activation de la zone cérébrale en question. Pour plus d'informations, voir Ferrari and Quaresima (2012).

plus-value aux données comportementales existantes. Cet outil pourrait également servir (i) à mieux comprendre la situation d'Improvisation Jointe dans laquelle un échange de rôles sociaux est observé, (ii) mais aussi à confirmer nos résultats montrant une moindre créativité chez les personnes souffrant de schizophrénie.

Au-delà du domaine sportif pour lequel ces résultats sont intéressants, la robotique semble être également un champ où ces travaux pourraient trouver un écho favorable. Etant donné les progrès technologiques constants, la robotique et la réalité virtuelle sont de plus en plus présentes dans la vie quotidienne. Beaucoup d'études développent d'ailleurs des architectures cognitives afin d'animer ces partenaires artificiels (Dumas, de Guzman, Tognoli, & Kelso, 2014; Kostrubiec et al., 2015; Zhai, Alderisio, Slowinski, Tsaneva-Atanasova, & di Bernardo, 2016; Zhai et al., 2014). En ce sens, améliorer les comportements de ces partenaires particuliers semble prépondérant. Alors que les coordinations interpersonnelles ont été envisagées pour augmenter les interactions homme-machine (Marin, Issartel, & Chaminade, 2009), la créativité motrice n'a pas réellement été prise en compte. Or, les résultats présentés dans ce travail de thèse suggèrent que ce paramètre est à considérer dans les interactions sociales humaines. Il semble alors intéressant de réfléchir à l'intégration d'un composant de créativité propre à chaque oscillateur donnant plus de possibilités à l'avatar ou au robot. Cela permettrait d'apporter davantage d'adaptabilité aux comportements de ces partenaires animés pour répondre favorablement à l'interaction et plus globalement au contexte.

En conclusion, ce travail de thèse permet de mieux appréhender les situations d'improvisation socio-motrice. L'improvisation semble représenter un candidat sérieux dans un but de comprendre le comportement moteur des individus durant leurs interactions. Quatre apports importants émergent de nos résultats. Premièrement, un apport méthodologique. Le développement d'outils permettant l'analyse de la créativité sous toutes ces formes et de la coordination entre les mouvements complexes semble primordial pour la compréhension des phénomènes d'improvisation. Un consensus sur ces outils doit de plus être trouvé par les chercheurs de l'approche dynamique pour élargir leurs champs et possibilités d'action au sein du contrôle moteur. Deuxièmement, un apport conceptuel où l'absence de contraintes et la richesse des mouvements produits

remettent en question les différents modèles développés pour rendre compte de la coordination. L'intégration de la créativité, comme propriété intrinsèque de chaque individu, semble une piste intéressante permettant d'expliquer l'émergence de certains comportements d'improvisation. Troisièmement, un apport lié aux interactions sociales et leur compréhension. Nos différents résultats montrent un effet bénéfique de la coordination interpersonnelle sur la créativité mais aussi sur la stabilité posturale. Ces conclusions ouvrent la voie à de nouvelles perspectives dans l'apprentissage ou la réhabilitation. Finalement, un apport clinique démontrant que la pathologie sociale entraîne un déficit au niveau de la créativité des mouvements et de l'adaptation à l'interaction. L'ensemble de ces résultats offre des perspectives intéressantes dans la compréhension des interactions sociales, en présence ou non de pathologies sociales.

*"My mama always says life is like a box of chocolates.
You never know what you're gonna get."*

Forrest Gump



Bibliographie

A

- Abe, M., & Yamada, N. (2001). Postural coordination patterns associated with the swinging frequency of arms. *Exp Brain Res*, 139(1), 120-125.
- Abraham, A. (2014). Creative thinking as orchestrated by semantic processing vs. cognitive control brain networks. *Front Hum Neurosci*, 8, 95. doi:10.3389/fnhum.2014.00095
- Agars, M. D., Baer, J., & Kaufman, J. C. (2005). The Many Creativities of Business and the APT Model Of. *Korean Journal of Thinking & Problem Solving*, 133-140.
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nat Neurosci*, 11(9), 1109-1116.
- Agre, P. E., & Chapman, D. (1987). *Pengi: An Implementation of a Theory of Activity*. Paper presented at the Proceedings of the AAI, Seattle.
- Ainsworth, M. D. S., Blehar, M. C., Waters, E., & Wall, S. (1978). *Patterns of attachment*.
- Amabile, T. M. (1996). *Creativity in context: Update to " the social psychology of creativity."*
- Amazeen, P. G., Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1995). Frequency detuning of the phase entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, 72(6), 511-518.
- Andreasen, N. C. (1987). Creativity and Mental-Illness - Prevalence Rates in Writers and Their 1st-Degree Relatives. *American Journal of Psychiatry*, 144(10), 1288-1292.
- Andreasen, N. C., Flashman, L., Flaum, M., Arndt, S., Swayze, V., O'Leary, D. S., . . . Yuh, W. T. (1994). Regional brain abnormalities in schizophrenia measured with magnetic resonance imaging. *JAMA*, 272(22), 1763-1769.
- Andreasen, N. C., Rezai, K., Alliger, R., Swayze, V. W., 2nd, Flaum, M., Kirchner, P., . . . O'Leary, D. S. (1992). Hypofrontality in neuroleptic-naive patients and in patients with chronic schizophrenia. Assessment with xenon 133 single-photon emission computed tomography and the Tower of London. *Arch Gen Psychiatry*, 49(12), 943-958.
- Anzieu, D., & Martin, J. Y. (1968). *La Dynamique des groupes restreints*. Paris, Presses universitaires de France.

B

- Badino, L., D'Ausilio, A., Glowinski, D., Camurri, A., & Fadiga, L. (2014). Sensorimotor communication in professional quartets. *Neuropsychologia*, 55, 98-104. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.012
- Baek, K., Kim, Y. T., Kim, M., Choi, Y., Lee, M., Lee, K., . . . Jeong, J. (2013). Response randomization of one- and two-person rock-paper-scissors games in individuals with schizophrenia. *Psychiatry Res*, 207(3), 158-163. doi:10.1016/j.psychres.2012.09.003

- Baer, M., & Oldham, G. R. (2006). The curvilinear relation between experienced creative time pressure and creativity: Moderating effects of openness to experience and support for creativity. *Journal of Applied Psychology*, 91(4), 963-970. doi:10.1037/0021-9010.91.4.963
- Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behav Res Methods*, 37(3), 379-384.
- Baldissera, F., Cavallari, P., & Civaschi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neurosci Lett*, 34(1), 95-100.
- Bardy, B. G. (2004). Postural coordination dynamics in standing humans. *Coordination dynamics: Issues and trends*. Springer Berlin Heidelberg.
- Bardy, B. G., Marin, L., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 25(5), 1284-1301.
- Bardy, B. G., Oullier, O., Bootsma, R. J., & Stoffregen, T. A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 28(3), 499-514.
- Barnett, L., Barrett, A. B., & Seth, A. K. (2009). Granger causality and transfer entropy are equivalent for Gaussian variables. *Phys Rev Lett*, 103(23), 238701. doi:10.1103/PhysRevLett.103.238701
- Bateson, G. (1955). A theory of play and fantasy; a report on theoretical aspects of the project of study of the role of the paradoxes of abstraction in communication. *Psychiatr Res Rep Am Psychiatr Assoc*, 39-51.
- Beaty, R. E. (2015). The neuroscience of musical improvisation. *Neurosci Biobehav Rev*, 51, 108-117. doi:10.1016/j.neubiorev.2015.01.004
- Beaty, R. E., Benedek, M., Wilkins, R. W., Jauk, E., Fink, A., Silvia, P. J., . . . Neubauer, A. C. (2014). Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest. *Neuropsychologia*, 64, 92-98. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2014.09.019
- Beghetto, R. A., & Plucker, J. A. (2006). The Relationship Among Schooling, Learning, and Creativity: "All Roads Lead to Creativity" or "You Can't Get There from Here"?. In J. C. E. B. Kaufman, John (Ed) (Ed.), *Creativity and reason in cognitive development* (pp. 316-332): New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Bellgrove, M. A., Bradshaw, J. L., Velakoulis, D., Johnson, K. A., Rogers, M. A., Smith, D., & Pantelis, C. (2001). Bimanual coordination in chronic schizophrenia. *Brain Cogn*, 45, 325-341. doi:10.1006/brcg.2000.1261
- Bengtsson, S. L., Csikszentmihalyi, M., & Ullen, F. (2007). Cortical regions involved in the generation of musical structures during improvisation in pianists. *J Cogn Neurosci*, 19, 830-842. doi:10.1162/jocn.2007.19.5.830
- Berkowitz, A. L., & Ansari, D. (2010). Expertise-related deactivation of the right temporoparietal junction during musical improvisation. *Neuroimage*, 49(1), 712-719. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.08.042
- Berliner, D. C., & Tikunoff, W. J. (1976). The California beginning teacher evaluation study: Overview of the ethnographic study. *Journal of Teacher Education*, 27(1), 24-30.

- Berliner, P. F. (1994). *Thinking in jazz: The infinite art of improvisation*.
- Bernieri, F. J. (1988). Coordinated movement and rapport in teacher-student interactions. *Journal of Nonverbal Behavior*, 12(2), 120-138.
- Berry, K., Barrowclough, C., & Wearden, A. (2007). A review of the role of adult attachment style in psychosis: unexplored issues and questions for further research. *Clin Psychol Rev*, 27, 458-475. doi:10.1016/j.cpr.2006.09.006
- Bingham, G. P., Schmidt, R. C., Turvey, M. T., & Rosenblum, L. D. (1991). Task Dynamics and Resource Dynamics in the Assembly of a Coordinated Rhythmic Activity. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 17, 359-381. doi:Doi 10.1037/0096-1523.17.2.359
- Blom, L. A., & Chaplin, L. T. (1988). *The moment of movement: Dance improvisation*.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98, 11818-11823. doi:10.1073/pnas.191355898
- Boker, S. M., Xu, M., Rotondo, J. L., & King, K. (2002). Windowed cross-correlation and peak picking for the analysis of variability in the association between behavioral time series. *Psychol Methods*, 7(3), 338-355.
- Bonnet, V., Ramdani, S., Fraise, P., Ramdani, N., Lagarde, J., & Bardy, B. G. (2011). A structurally optimal control model for predicting and analyzing human postural coordination. *Journal of Biomechanics*, 44, 2123-2128. doi:10.1016/j.jbiomech.2011.05.027
- Bourbousson, J., Seve, C., & McGarry, T. (2010). Space-time coordination dynamics in basketball: Part 2. The interaction between the two teams. *J Sports Sci*, 28, 349-358. doi:10.1080/02640410903503640
- Branigan, H. P., Pickering, M. J., & Cleland, A. A. (2000). Syntactic co-ordination in dialogue. *Cognition*, 75, B13-25.
- Brod, J. H. (1997). Creativity and schizotypy. In G. S. C. (Ed.) (Ed.), *Schizotypy : Implications for illness and health* (pp. 276-298): Oxford University Press.
- Bruce, M. L., Takeuchi, D. T., & Leaf, P. J. (1991). Poverty and psychiatric status. Longitudinal evidence from the New Haven Epidemiologic Catchment Area study. *Arch Gen Psychiatry*, 48, 470-474.
- Brune, M., Sonntag, C., Abdel-Hamid, M., Lehmkaemper, C., Juckel, G., & Troisi, A. (2008). Nonverbal behavior during standardized interviews in patients with schizophrenia spectrum disorders. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 196, 282-288. doi:10.1097/NMD.0b013e31816a4922
- Brunet, P. M., Donnan, H., McKeown, G., Douglas-Cowie, E., & Cowie, R. (2009). *Social signal processing: What are the relevant variables? and in what ways do they relate?* Paper presented at the 3rd International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops.
- Burgoon, J. K., Newton, D. A., Walther, J. B., & Baesler, E. J. (1989). Nonverbal expectancy violations and conversational involvement. *Journal of Nonverbal Behavior*, 13, 97-119.
- Byblow, W. D., Chua, R., Bysouth-Young, D. F., & Summers, J. J. (1999). Stabilisation of bimanual coordination through visual coupling. *Human Movement Science*, 18, 281-305. doi:Doi 10.1016/S0167-9457(99)00012-3

C

- Cannon, M., & Clarke, M. C. (2005). Risk for schizophrenia--broadening the concepts, pushing back the boundaries. *Schizophr Res*, 79. 10.1016/j.schres.2005.05.027
- Cannon, M., Jones, P. B., & Murray, R. M. (2002). Obstetric complications and schizophrenia: historical and meta-analytic review. *Am J Psychiatry*, 159, 1080-1092. doi:10.1176/appi.ajp.159.7.1080
- Cannon, T. D., Rosso, I. M., Hollister, J. M., Bearden, C. E., Sanchez, L. E., & Hadley, T. (2000). A prospective cohort study of genetic and perinatal influences in the etiology of schizophrenia. *Schizophr Bull*, 26, 351-366.
- Cao, L. (1997). Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 110, 43-50.
- Cardno, A. G., Marshall, E. J., Coid, B., Macdonald, A. M., Ribchester, T. R., Davies, N. J., . . . Murray, R. M. (1999). Heritability estimates for psychotic disorders: the Maudsley twin psychosis series. *Arch Gen Psychiatry*, 56, 162-168.
- Carlsson, I. (2002). Anxiety and flexibility of defense related to high or low creativity. *Creativity Research Journal*, 14, 341-349.
- Carroll, C. A., O'Donnell, B. F., Shekhar, A., & Hetrick, W. P. (2009). Timing dysfunctions in schizophrenia as measured by a repetitive finger tapping task. *Brain Cogn*, 71, 345-353. doi:10.1016/j.bandc.2009.06.009
- Carson, S. H., Peterson, J. B., & Higgins, D. M. (2005). Reliability, validity, and factor structure of the creative achievement questionnaire. *Creativity Research Journal*, 17, 37-50. doi:10.1207/s15326934crj1701_4
- Carter, C. L. (2000). Improvisation in dance. *Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 58, 181-190. doi:Doi 10.2307/432097
- Chan, K. K., Hui, C. L., Tang, J. Y., Chiu, C. P., Chan, S. K., Lam, M. M., & Chen, E. Y. (2011). Random number generation deficit in early schizophrenia. *Percept Mot Skills*, 112, 91-103. doi:10.2466/02.15.19.22.PMS.112.1.91-103
- Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *J Pers Soc Psychol*, 76, 893-910.
- Chen, Y., Palafox, G. P., Nakayama, K., Levy, D. L., Matthyse, S., & Holzman, P. S. (1999). Motion perception in schizophrenia. *Arch Gen Psychiatry*, 56, 149-154.
- Chen, Y. H., Rangarajan, G., Feng, J. F., & Ding, M. Z. (2004). Analyzing multiple nonlinear time series with extended Granger causality. *Physics Letters A*, 324, 26-35.
- Clark, H. H. (1996). *Using language*.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Condon, W. S., & Ogston, W. D. (1966). Sound Film Analysis of Normal and Pathological Behavior Patterns. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 143.
- Conein, B. (1998). Les sens sociaux: coordination de l'attention et interaction sociale. *Intellectica*, 1, 26-27.
- Coolican, H. (2009). *Research methods and statistics in psychology*.

- Costa, P. T., & McCrae, R. R. (1995). Domains and Facets - Hierarchical Personality-Assessment Using the Revised Neo Personality-Inventory. *Journal of Personality Assessment*, 64, 21-50. doi: 10.1207/s15327752jpa6401_2
- Coste, A., Gueugnon, M., Salesse, R. N., Bardy, B. G., & Marin, L. (2015). Synchronisation du système postural à l'aide d'une stimulation auditive périodique discrète. *Clinical Neurophysiology*, 45, 413.
- Craft, A. (2001a). *Little 0 Creativity Creativity in education: A&C Black*.
- Craft, A. (2001b). An analysis of research and literature on creativity in education. *Qualifications and Curriculum Authority*, 1-37.
- Crow, T. J. (1980). Positive and negative schizophrenic symptoms and the role of dopamine. *Br J Psychiatry*, 137, 383-386.

D

- De Carli, F., Nobili, L., Beelke, M., Watanabe, T., Smerieri, A., Parrino, L., . . . Ferrillo, F. (2004). Quantitative analysis of sleep EEG microstructure in the time-frequency domain. *Brain Research Bulletin*, 63, 399-405.
- De Jaegher, H., Di Paolo, E., & Gallagher, S. (2010). Can social interaction constitute social cognition? *Trends in cognitive sciences*, 14, 441-447.
- De Michele, G., Sello, S., Carboncini, M. C., Rossi, B., & Strambi, S. K. (2003). Cross-correlation time-frequency analysis for multiple EMG signals in Parkinson's disease: a wavelet approach. *Medical Engineering & Physics*, 25, 361-369.
- de Ruyg, A., Salesse, R., Oullier, O., & Temprado, J. J. (2006). A neuro-mechanical model for interpersonal coordination. *Biological Cybernetics*, 94, 427-443. doi:10.1007/s00422-006-0059-7
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., . . . Fazio, F. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, 120, 1763-1777.
- Del-Monte, J., Raffard, S., Salesse, R. N., Marin, L., Schmidt, R. C., Varlet, M., . . . Capdevielle, D. (2013). Nonverbal expressive behaviour in schizophrenia and social phobia. *Psychiatry Res*, 210, 29-35. doi:10.1016/j.psychres.2013.05.034
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Exp Brain Res*, 91, 176-180.
- Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychol Bull*, 136, 822-848. doi:10.1037/a0019749
- Ding, M., Chen, Y., & Bressler, S. L. (2006). Granger causality: basic theory and application to neuroscience *Handbook of time series analysis: recent theoretical developments and applications*.
- Donnay, G. F., Rankin, S. K., Lopez-Gonzalez, M., Jiradejvong, P., & Limb, C. J. (2014). Neural substrates of interactive musical improvisation: an fMRI study of 'trading fours' in jazz. *PLoS One*, 9. doi:10.1371/journal.pone.0088665

- Duarte, M., Harvey, W., & Zatsiorsky, V. M. (2000). Stabilographic analysis of unconstrained standing. *Ergonomics*, 43, 1824-1839.
- Duarte, M., & Zatsiorsky, V. M. (1999). Patterns of center of pressure migration during prolonged unconstrained standing. *Motor Control*, 3, 12-27.
- Dumas, G., de Guzman, G. C., Tognoli, E., & Kelso, J. A. (2014). The human dynamic clamp as a paradigm for social interaction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111, E3726-3734. doi:10.1073/pnas.1407486111.

E

- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1969). Nonverbal leakage and clues to deception. *Psychiatry*, 32(1), 88-106.
- Erickson, F. (1982). Classroom discourse as improvisation: Relationships between academic task structure and social participation structure in lessons. *Communicating in the classroom* (pp. 153-181).

F

- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *J Neurophysiol*, 73, 2608-2611.
- Feist, G. J. (1998). A meta-analysis of personality in scientific and artistic creativity. *Pers Soc Psychol Rev*, 2, 290-309. doi:10.1207/s15327957pspr0204_5.
- Feniger-Schaal, R., Noy, L., Hart, Y., Koren-Karie, N., Mayo, A. E., & Alon, U. (2016). Would you like to play together? Adults' attachment and the mirror game. *Attach Hum Dev*, 18, 33-45. doi:10.1080/14616734.2015.1109677
- Ferrari, M., & Quaresima, V. (2012). A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *Neuroimage*, 63, 921-935. doi:10.1016/j.neuroimage.2012.03.049
- Ferry, M., Cahouet, V., & Martin, L. (2007). Postural coordination modes and transition: dynamical explanations. *Exp Brain Res*, 180, 49-57. doi:10.1007/s00221-006-0843-6
- Flash, T., & Hochner, B. (2005). Motor primitives in vertebrates and invertebrates. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 660-666. doi:10.1016/j.conb.2005.10.011
- Forner-Cordero, A., Levin, O., Li, Y., & Swinnen, S. P. (2007). Posture control and complex arm coordination: analysis of multijoint coordinative movements and stability of stance. *J Mot Behav*, 39, 215-226. doi:10.3200/JMBR.39.3.215-226
- Fox, J. W. (1990). Social class, mental illness, and social mobility: the social selection-drift hypothesis for serious mental illness. *J Health Soc Behav*, 31, 344-353.
- Freiwald, W. A., Valdes, P., Bosch, J., Biscay, R., Jimenez, J. C., Rodriguez, L. M., . . . Singer, W. (1999). Testing non-linearity and directedness of interactions

between neural groups in the macaque inferotemporal cortex. *Journal of Neuroscience Methods*, 94, 105-119.

Frost, A., & Yarrow, R. (1990). *Improvisation in drama*. New York: St. Martin's Press.

Fuchs, A., Jirsa, V. K., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1996). Extending the HKB model of coordinated movement to oscillators with different eigenfrequencies. *Biological Cybernetics*, 74(1), 21-30.

G

Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119, 593-609.

Gangitano, M., Mottaghy, F. M., & Pascual-Leone, A. (2001). Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*, 12, 1489-1492.

Gardner, H. (1993). *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences*.

Gardner, H. (2011). *Creating minds: An anatomy of creativity seen through the lives of Freud, Einstein, Picasso, Stravinsky, Eliot, Graham, and Gandhi*.

Giacco, D., McCabe, R., Kallert, T., Hansson, L., Fiorillo, A., & Priebe, S. (2012). Friends and symptom dimensions in patients with psychosis: a pooled analysis. *PLoS One*, 7, e50119. doi:10.1371/journal.pone.0050119

Gibbs, R. W. (2006). *Embodiment and cognitive science*.

Giddins, G. (1998). *Visions of jazz : the first century*. New York: Oxford University Press.

Glahn, D. C., Ragland, J. D., Abramoff, A., Barrett, J., Laird, A. R., Bearden, C. E., & Velligan, D. I. (2005). Beyond hypofrontality: a quantitative meta-analysis of functional neuroimaging studies of working memory in schizophrenia. *Hum Brain Mapp*, 25, 60-69. doi:10.1002/hbm.20138

Goffman, E. (1961). *Encounters: Two studies in the sociology of interaction ?*

Goffman, E. (1981). *Forms of talk*.

Goldberg, L. R. (1981). Language and individual differences: The search for universals in personality lexicons. *Review of personality and social psychology*, 2, 141-165.

Goldberg, R. W., Rollins, A. L., & Lehman, A. F. (2003). Social network correlates among people with psychiatric disabilities. *Psychiatr Rehabil J*, 26, 393-402.

Goldin-Meadow, S. (1999). The role of gesture in communication and thinking. *Trends Cogn Sci*, 3, 419-429.

Gowen, E., Stanley, J., & Miall, R. C. (2008). Movement interference in autism-spectrum disorder. *Neuropsychologia*, 46, 1060-1068. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2007.11.004

Granger, C. W. J. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods. *Econometrica*, 37.

- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566.
- Guilford, J. P. (1950). Creativity. *Am Psychol*, 5, 444-454.

H

- Haken, H. (1983). *Synergetics. An Introduction*. Springer Series in Synergetics, Berlin.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A Theoretical-Model of Phase-Transitions in Human Hand Movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356. doi:10.1007/Bf00336922.
- Hamill, J., McDermott, W. J., & Haddad, J. M. (2000). Issues in quantifying variability from a dynamical systems perspective. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 407-418.
- Hamilton, J. D. (1994). *Time series analysis*.
- Harrison, P. J., & Owen, M. J. (2003). Genes for schizophrenia? Recent findings and their pathophysiological implications. *Lancet*, 361, 417-419. doi:10.1016/S0140-6736(03)12379-3.
- Hart, Y., Noy, L., Feniger-Schaal, R., Mayo, A. E., & Alon, U. (2014). Individuality and Togetherness in Joint Improvised Motion. *PLoS One*, 9. doi:10.1371/journal.pone.0087213
- Hazan, C., & Shaver, P. (1987). Romantic love conceptualized as an attachment process. *J Pers Soc Psychol*, 52, 511-524.
- Henquet, C., Murray, R., Linszen, D., & van Os, J. (2005). The environment and schizophrenia: the role of cannabis use. *Schizophr Bull*, 31, 608-612. doi:10.1093/schbul/sbi027
- Horne, R. L., Evans, F. J., & Orne, M. T. (1982). Random number generation, psychopathology and therapeutic change. *Arch Gen Psychiatry*, 39, 680-683.
- Hornero, R., Alonso, A., Jimeno, N., Jimeno, A., & Lopez, M. (1999). Nonlinear analysis of time series generated by schizophrenic patients. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 18, 84-90.
- Hove, M. J., & Risen, J. L. (2009). It's All in the Timing: Interpersonal Synchrony Increases Affiliation. *Social Cognition*, 27, 949-960.
- Hristovski, R., Davids, K., Passos, P., & Araújo, D. (2012). Sport performance as a domain of creative problem solving for self-organizing performer-environment systems. *The Open Sports Sciences Journal*, 5, 26-35.
- Huys, R., Studenka, B. E., Rheaume, N. L., Zelaznik, H. N., & Jirsa, V. K. (2008). Distinct timing mechanisms produce discrete and continuous movements. *PLoS Comput Biol*, 4, e1000061. doi:10.1371/journal.pcbi.1000061

I

- Insel, T. R., & Fernald, R. D. (2004). How the brain processes social information: searching for the social brain. *Annu Rev Neurosci*, 27, 697-722. doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144148.
- Isenhower, R. W., Richardson, M. J., Carello, C., Baron, R. M., & Marsh, K. L. (2010). Affording cooperation: embodied constraints, dynamics, and action-scaled invariance in joint lifting. *Psychon Bull Rev*, 17, 342-347. doi:10.3758/PBR.17.3.342.
- Issartel, J., Bardainne, T., Gaillot, P., & Marin, L. (2015). The relevance of the cross-wavelet transform in the analysis of human interaction - a tutorial. *Front Psychol*, 5, 1566. doi:10.3389/fpsyg.2014.01566.
- Issartel, J., Marin, L., & Cadopi, M. (2006a). *Consequences of dance expertise on interpersonal interaction*. Paper presented at the Proceedings from the Third International Conference on Enactive Interfaces, Montpellier, France.
- Issartel, J., Marin, L., & Cadopi, M. (2007). Unintended interpersonal co-ordination: "we march to the beat of our own drum?". *Neuroscience Letters*, 411, 174-179. doi:10.1016/j.neulet.2006.09.086.
- Issartel, J., Marin, L., Gaillot, P., Bardainne, T., & Cadopi, M. (2006b). A practical guide to time-frequency analysis in the study of human motor behavior: the contribution of wavelet transform. *J Mot Behav*, 38, 139-159. doi:10.3200/JMBR.38.2.139-159.

J

- Jacobs, A., Pinto, J., & Shiffrar, M. (2004). Experience, context, and the visual perception of human movement. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 30, 822-835. doi:10.1037/0096-1523.30.5.822.
- Jeannerod, M. (1984). The timing of natural prehension movements. *J Mot Behav*, 16, 235-254.
- Jeka, J. J., & Kelso, J. A. (1995). Manipulating symmetry in the coordination dynamics of human movement. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21, 360-374.
- Jordan, B., & Henderson, A. (1995). Interaction analysis: Foundations and practice. *Journal of the Learning Sciences*, 4, 39-103. doi:DOI 10.1207/s15327809jls0401_2.
- Jung, R. E., Mead, B. S., Carrasco, J., & Flores, R. A. (2013). The structure of creative cognition in the human brain. *Front Hum Neurosci*, 7, 330. doi:10.3389/fnhum.2013.00330.

K

- Kamoche, K., & Pina e Cunha, M. P. (2001). Minimal structures: From jazz improvisation to product innovation. *Organization Studies*, 22, 733-764.
- Kantz, H., & Schreiber, T. (1997). Nonlinear Time Series Analysis. *Nonlinear Science Series*.
- Kaufman, J. C. (2012). Counting the Muses: Development of the Kaufman Domains of Creativity Scale (K-DOCS). *Psychology of Aesthetics Creativity and the Arts*, 6, 298-308. doi:10.1037/a0029751.
- Kaufman, J. C., & Beghetto, R. A. (2009). Beyond Big and Little: The Four C Model of Creativity. *Review of General Psychology*, 13, 1-12. doi:10.1037/a0013688.
- Kaufman, J. C., Cole, J. C., & Baer, J. (2009). The Construct of Creativity: Structural Model for Self-Reported Creativity Ratings. *Journal of Creative Behavior*, 43, 119-134.
- Keller, M. C., & Visscher, P. M. (2015). Genetic variation links creativity to psychiatric disorders. *Nat Neurosci*, 18, 928-929. doi:10.1038/nn.4047.
- Kelly, B. D., O'Callaghan, E., Waddington, J. L., Feeney, L., Browne, S., Scully, P. J., . . . Larkin, C. (2010). Schizophrenia and the city: A review of literature and prospective study of psychosis and urbanicity in Ireland. *Schizophr Res*, 116, 75-89. doi:10.1016/j.schres.2009.10.015.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6).
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Rubin, P., & Kugler, P. N. (1981). Patterns of human interlimb coordination emerge from the properties of non-linear, limit cycle oscillatory processes: theory and data. *J Mot Behav*, 13, 226-261.
- Kelso, J. A. S. (1981). On the oscillatory basis of movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*.
- Kelso, J. A. S., de Guzman, G. C., Reveley, C., & Tognoli, E. (2009). Virtual Partner Interaction (VPI): Exploring Novel Behaviors via Coordination Dynamics. *PLoS One*, 4. doi: 10.1371/journal.pone.0005749.
- Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In E. In: M. Jeannerod (Ed.), *Attention and Performance XIII*, Hillsdale, NJ: LEA.
- Kelso, J. A. S., & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7(1), 27-46.
- Kendon, A. (1970). Movement coordination in social interaction: some examples described. *Acta Psychol*, 32, 100-125.
- Kéri, S. (2009). Genes for psychosis and creativity: a promoter polymorphism of the neuregulin 1 gene is related to creativity in people with high intellectual achievement. *Psychological Science*, 20, 1070-1073. doi:10.1111/j.1467-9280.2009.02398.

- Kiefer, A. W., Riley, M. A., Shockley, K., Sitton, C. A., Hewett, T. E., Cummins-Sebree, S., & Haas, J. G. (2011). Multi-segmental postural coordination in professional ballet dancers. *Gait Posture*, 34, 76-80. doi:10.1016/j.gaitpost.2011.03.016.
- Kilner, J. M., Paulignan, Y., & Blakemore, S. J. (2003). An interference effect of observed biological movement on action. *Curr Biol*, 13, 522-525.
- Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological research on joint action: theory and data. *Psychology of Learning and Motivation-Advances in Research and Theory*.
- Konvalinka, I., Bauer, M., Stahlhut, C., Hansen, L. K., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2014). Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: multivariate decoding of mutually interacting brains. *Neuroimage*, 94, 79-88. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.03.003.
- Kopelowicz, A., Lopez, S. R., Zarate, R., O'Brien, M., Gordon, J., Chang, C., & Gonzalez-Smith, V. (2006). Expressed emotion and family interactions in Mexican Americans with schizophrenia. *Journal of Nervous and Mental Disease*, 194(5), 330-334.
- Korjus, K. (2011). *Causality Measures in Neuroscience: Wiener-Granger causality and transfer entropy applied to intracranial EEG data*. University of Manchester (Master Thesis).
- Kostrubiec, V., Dumas, G., Zanone, P. G., & Kelso, J. A. (2015). The Virtual Teacher (VT) Paradigm: Learning New Patterns of Interpersonal Coordination Using the Human Dynamic Clamp. *PLoS One*, 10, e0142029. doi:10.1371/journal.pone.0142029.
- Kralemann, B., Cimponeriu, L., Rosenblum, M., Pikovsky, A., & Mrowka, R. (2007). Uncovering interaction of coupled oscillators from data. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 76. doi:10.1103/PhysRevE.76.055201.
- Kralemann, B., Cimponeriu, L., Rosenblum, M., Pikovsky, A., & Mrowka, R. (2008). Phase dynamics of coupled oscillators reconstructed from data. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 77. doi:10.1103/PhysRevE.77.066205.
- Krauss, R. M., Chen, Y. S., & Chawla, P. (1996). Nonverbal behavior and nonverbal communication: What do conversational hand gestures tell us? *Advances in Experimental Social Psychology*, 28, 389-450. doi:10.1016/S0065-2601(08)60241-5.
- Krauss, R. M., Dushay, R. A., Chen, Y. S., & Rauscher, F. (1995). The communicative value of conversational hand gestures. *Journal of Experimental Social Psychology*, 31, 533-552. doi:DOI 10.1006/jesp.1995.1024.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*.
- Kupper, Z., Ramseyer, F., Hoffmann, H., Kalbermatten, S., & Tschacher, W. (2010). Video-based quantification of body movement during social interaction indicates the severity of negative symptoms in patients with schizophrenia. *Schizophr Res*, 121, 90-100. doi:10.1016/j.schres.2010.03.032.
- Kupper, Z., Ramseyer, F., Hoffmann, H., & Tschacher, W. (2015). Nonverbal Synchrony in Social Interactions of Patients with Schizophrenia Indicates Socio-Communicative Deficits. *PLoS One*, 10. doi:10.1371/journal.pone.0145882.

Kyaga, S., Lichtenstein, P., Boman, M., Hultman, C., Langstrom, N., & Landen, M. (2011). Creativity and mental disorder: family study of 300,000 people with severe mental disorder. *Br J Psychiatry*, 199, 373-379. doi:10.1192/bjp.bp.110.085316.

L

LaFrance, M. (1982). Posture mirroring and rapport. *Interaction rhythms: Periodicity in communicative behavior*, 279-298.

Lakin, J. L., & Chartrand, T. L. (2003). Using nonconscious behavioral mimicry to create affiliation and rapport. *Psychological Science*, 14(4), 334-339. doi:10.1111/1467-9280.14481.

Lakin, J. L., Jefferis, V. E., Cheng, C. M., & Chartrand, T. L. (2003). The chameleon effect as social glue: Evidence for the evolutionary significance of nonconscious mimicry. *Journal of Nonverbal Behavior*, 27, 145-162. doi:10.1023/A:1025389814290.

Lauronen, E., Veijola, J., Isohanni, I., Jones, P. B., Nieminen, P., & Isohanni, M. (2004). Links between creativity and mental disorder. *Psychiatry*, 67, 81-98.

Lavelle, M., Healey, P. G., & McCabe, R. (2013). Is nonverbal communication disrupted in interactions involving patients with schizophrenia? *Schizophr Bull*, 39, 1150-1158. doi:10.1093/schbul/sbs091.

Lawrie, S. M., & Abukmeil, S. S. (1998). Brain abnormality in schizophrenia. A systematic and quantitative review of volumetric magnetic resonance imaging studies. *Br J Psychiatry*, 172, 110-120.

Lazerges, P. E., Cermolacce, M., Fakra, E., Tassy, S., Azorin, J. M., Huguet, P., . . . Oullier, O. (2011). Interpersonal sensorimotor coordination dynamics in schizophrenic patients: introducing a new experimental paradigm. *Encephale*, 37, 100-109. doi:10.1016/S0013-700670035-5.

Lee, W. A. (1989). A control systems framework for understanding normal and abnormal posture. *Am J Occup Ther*, 43, 291-301.

Liberman, R. P., DeRisi, W. J., & Mueser, K. T. (1989). *Social skills training for psychiatric patients*.

Limb, C. J., & Braun, A. R. (2008). Neural substrates of spontaneous musical performance: an fMRI study of jazz improvisation. *PLoS One*, 3. doi:10.1371/journal.pone.0001679.

Liu, S., Chow, H. M., Xu, Y., Erkkinen, M. G., Swett, K. E., Eagle, M. W., . . . Braun, A. R. (2012). Neural correlates of lyrical improvisation: an fMRI study of freestyle rap. *Sci Rep*, 2, 834. doi:10.1038/srep00834.

Lobo, Y. B., & Winsler, A. (2006). The effects of a creative dance and movement program on the social competence of head start preschoolers. *Social Development*, 15, 501-519. doi:10.1111/j.1467-9507.2006.00353.x

- Lopresti-Goodman, S. M., Richardson, M. J., Silva, P. L., & Schmidt, R. C. (2008). Period basin of entrainment for unintentional visual coordination. *J Mot Behav*, 40, 3-10. doi:10.3200/JMBR.40.1.3-10.
- Lubart, T. I., Besançon, M., & Barbot, B. (2011). *Evaluation du potentiel créatif (EPoC)*.
- Lubart, T. I. (2005). *Psychologie de la créativité*.

M

- Makinen, J., Miettunen, J., Isohanni, M., & Koponen, H. (2008). Negative symptoms in schizophrenia: a review. *Nord J Psychiatry*, 62, 334-341. doi:10.1080/08039480801959307.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Fluckiger, M., & Stoffregen, T. A. (1999). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance. *Human Movement Science*, 18, 31-47. doi:10.1016/S0167-9457(98)00032-3.
- Marin, L., Issartel, J., & Chaminade, T. (2009). Interpersonal motor coordination From human-human to human-robot interactions. *Interaction Studies*, 10, 479-504. doi:10.1075/is.10.3.09.
- Marsh, K. L., Richardson, M. J., & Schmidt, R. C. (2009). Social connection through joint action and interpersonal coordination. *Top Cogn Sci*, 1, 320-339. doi:10.1111/j.1756-8765.2009.01022.
- Marvel, C. L., Schwartz, B. L., & Rosse, R. B. (2004). A quantitative measure of postural sway deficits in schizophrenia. *Schizophr Res*, 68, 363-372. doi:10.1016/j.schres.2003.09.003.
- Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M., & Kurths, J. (2007). Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 438, 237-329. doi:10.1016/j.physrep.2006.11.001.
- Marwan, N., Thiel, M., & Nowaczyk, N. R. (2002). Cross recurrence plot based synchronization of time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9, 325-331.
- Maslow, A. H. (1954). *Motivation and personality*. Hoper & Row, 80-106.
- Maybin, J., & Swann, J. (2007). Everyday creativity in language: Textuality, contextuality, and critique. *Applied Linguistics*, 28, 497-517. doi:10.1093/applin/amm036.
- McGhie, A., & Chapman, J. (1961). Disorders of Attention and Perception in Early Schizophrenia. *British Journal of Medical Psychology*, 34.
- McGuffin, P., Owen, M. J., & Farmer, A. E. (1995). Genetic basis of schizophrenia. *Lancet*, 346, 678-682.
- McNeill, W. H. (1997). *Keeping together in time : Dance and drill in human history*.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of Facial and Manual Gestures by Human Neonates. *Science*, 198, 75-78.

- Mickelson, K. D., Kessler, R. C., & Shaver, P. R. (1997). Adult attachment in a nationally representative sample. *J Pers Soc Psychol*, 73, 1092-1106.
- Möller, H. J. (2007). Clinical evaluation of negative symptoms in schizophrenia. *Eur Psychiatry*, 22, 380-386. doi:10.1016/j.eurpsy.2007.03.010.
- Moore, T. H., Zammit, S., Lingford-Hughes, A., Barnes, T. R., Jones, P. B., Burke, M., & Lewis, G. (2007). Cannabis use and risk of psychotic or affective mental health outcomes: a systematic review. *Lancet*, 370, 319-328. doi:10.1016/S0140-6736(07)61162-3.
- Moreau, C. P., & Dahl, D. W. (2005). Designing the solution: The impact of constraints on consumers' creativity. *Journal of Consumer Research*, 32, 13-22. doi:Doi 10.1086/429597.
- Morlet, J. (1983). *Sampling theory and wave propagation*.
- Mormann, F., Lehnertz, K., David, P., & Elger, C. E. (2000). Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients. *Physica D*, 144, 358-369. doi:Doi 10.1016/S0167-2789(00)00087-7.
- Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Curr Biol*, 20, 750-756. doi:10.1016/j.cub.2010.02.045.
- Mundy, P., Sigman, M., Ungerer, J., & Sherman, T. (1986). Defining the social deficits of autism: the contribution of non-verbal communication measures. *J Child Psychol Psychiatry*, 27(5), 657-669.

N

- Nachmanovitch, S. (1990). *Free play: Improvisation in life and art*.
- Nashner, L. M., & Mccollum, G. (1985). The Organization of Human Postural Movements - a Formal Basis and Experimental Synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*, 8, 135-150.
- Neda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., & Barabasi, A. L. (2000). The sound of many hands clapping - Tumultuous applause can transform itself into waves of synchronized clapping. *Nature*, 403, 849-850. doi:Doi 10.1038/35002660
- Neelam, K., Garg, D., & Marshall, M. (2011). A systematic review and meta-analysis of neurological soft signs in relatives of people with schizophrenia. *BMC Psychiatry*, 11, 139. doi:10.1186/1471-244X-11-139
- Newcomb, T. M. (1953). An approach to the study of communicative acts. *Psychological review*, 60.
- Newell, K. M. (1985). Coordination, control and skill. In R. B. W. I. M. F. E. D. Goodman (Ed.), *Differing perspectives in motor learning, memory and control* (pp. 295-317).
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. *Motor development in children: Aspects of coordination and control*, 34, 341-360.

- Newell, K. M., Vanemmerik, R. E. A., Lee, D., & Sprague, R. L. (1993). On Postural Stability and Variability. *Gait & Posture*, 1, 225-230. doi:10.1016/0966-6362(93)90050-B.
- Novack, C. J. (1990). *Sharing the dance: Contact improvisation and American culture*.
- Noy, L., Dekel, E., & Alon, U. (2011). The mirror game as a paradigm for studying the dynamics of two people improvising motion together. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 20947-20952. doi:10.1073/pnas.1108155108.
- Noy, L., Levit-Binun, N., & Golland, Y. (2015). Being in the zone: physiological markers of togetherness in joint improvisation. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. doi:10.3339/fnhum.2015.00187.

O

- Okazaki, S., Hirotani, M., Koike, T., Bosch-Bayard, J., Takahashi, H. K., Hashiguchi, M., & Sadato, N. (2015). Unintentional Interpersonal Synchronization Represented as a Reciprocal Visuo-Postural Feedback System: A Multivariate Autoregressive Modeling Approach. *PLoS One*, 10, e0137126. doi:10.1371/journal.pone.0137126
- Orzack, M. H., & Kornetsky, C. (1966). Attention dysfunction in chronic schizophrenia. *Arch Gen Psychiatry*, 14, 323-326.
- Oullier, O., Bardy, B. G., Stoffregen, T. A., & Bootsma, R. J. (2002). Postural coordination in looking and tracking tasks. *Hum Mov Sci*, 21, 147-167.
- Oullier, O., de Guzman, G. C., Jantzen, K. J., Lagarde, J., & Kelso, J. A. (2008). Social coordination dynamics: measuring human bonding. *Soc Neurosci*, 3, 178-192. doi:10.1080/17470910701563392.
- Oullier, O., Marin, L., Stoffregen, T. A., Bootsma, R. J., & Bardy, B. G. (2006). Variability in postural coordination dynamics. *Movement system variability*.

P

- Park, S., Matthews, N., & Gibson, C. (2008). Imitation, simulation, and schizophrenia. *Schizophr Bull*, 34, 698-707. doi:10.1093/schbul/sbn048.
- Paulus, P. B., & Nijstad, B. A. (2003). *Group creativity: An introduction*.
- Peen, J., & Dekker, J. (1997). Admission rates for schizophrenia in The Netherlands: an urban/rural comparison. *Acta Psychiatr Scand*, 96, 301-305.
- Peters, B. T., Haddad, J. M., Heiderscheidt, B. C., Van Emmerik, R. E., & Hamill, J. (2003). Limitations in the use and interpretation of continuous relative phase. *J Biomech*, 36, 271-274.
- Picard, D. (1992). De la communication à l'interaction: l'évolution des modèles. *Communication et langages*, 93, 69-83.

- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2001). *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*.
- Pina e Cunha, M., Vieira da Cunha, J., & Kamoche, K. (1999). Organizational improvisation: What, when, how and why. *International journal of management reviews*, 1, 299-341.
- Poe, E. A. (1856). *Histoires extraordinaires*. A. Quantin.
- Pressing, J. (1987). The micro-and macrostructural design of improvised music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 5, 133-172.
- Pressing, J. (1988). Improvisation: methods and models. In O. John A. Sloboda (Hg.) (Ed.), *Generative processes in music* (pp. 129-178).
- Pressing, J. (1998). Psychological Constraints on Improvisational Expertise and Communication. In C. a. L. University of Chicago Press (Ed.), *In the course of performance. Studies in the world of musical improvisation*. (pp. 47-67).
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129-154. doi:Doi 10.1080/713752551.
- Prokopenko, M., Lizier, J. T., & Price, D. C. (2013). On Thermodynamic Interpretation of Transfer Entropy. *Entropy*, 15(2), 524-543. doi:10.3390/e15020524.

R

- Ramenzoni, V. C., Davis, T. J., Riley, M. A., Shockley, K., & Baker, A. A. (2011). Joint action in a cooperative precision task: nested processes of intrapersonal and interpersonal coordination. *Experimental Brain Research*, 211, 447-457. doi:10.1007/s00221-011-2653-8.
- Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K., & Baker, A. A. (2012). Interpersonal and intrapersonal coordinative modes for joint and single task performance. *Human Movement Science*, 31, 1253-1267. doi:10.1016/j.humov.2011.12.004.
- Ramseyer, F., & Tschacher, W. (2006). Synchrony: A core concept for a constructivist approach to psychotherapy. *Constructivism in the human sciences*, 11, 150-171.
- Ramseyer, F., & Tschacher, W. (2011). Nonverbal synchrony in psychotherapy: coordinated body movement reflects relationship quality and outcome. *J Consult Clin Psychol*, 79, 284-295. doi:10.1037/a0023419.
- Raymond (de), J. F. (1980). *L'improvisation*.
- Repp, B. H., & Su, Y. H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006-2012). *Psychon Bull Rev*, 20, 403-452. doi:10.3758/s13423-012-0371-2.
- Richards, R. (1990). Everyday creativity, eminent creativity, and health: "Afterview"; for CRJ Issues on creativity and health. *Creativity Research Journal*, 3, 300-326.
- Richardson, D. C., & Dale, R. (2005). Looking to understand: the coupling between speakers' and listeners' eye movements and its relationship to discourse comprehension. *Cogn Sci*, 29, 1045-1060. doi:10.1207/s15516709cog000029.

- Richardson, M. J., Campbell, W. L., & Schmidt, R. C. (2009). Movement interference during action observation as emergent coordination. *Neurosci Lett*, 449, 117-122. doi:10.1016/j.neulet.2008.10.092.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Baron, R. M. (2007). Judging and actualizing intrapersonal and interpersonal affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 33, 845-859. doi:10.1037/0096-1523.33.4.845.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Hum Mov Sci*, 26, 867-891. doi:10.1016/j.humov.2007.07.002.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Schmidt, R. C. (2005). Effects of visual and verbal interaction on unintentional interpersonal coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 31, 62-79. doi:10.1037/0096-1523.31.1.62.
- Riggio, R. E., & Feldman, R. S. (2005). Introduction to applications of nonverbal communication. *Applications of Nonverbal Communication*.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci*, 27, 169-192. doi:10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Res Cogn Brain Res*, 3, 131-141.
- Rogers, D. (1992). Friern study. In R. D. J. W. sons (Ed.), *Motor disorder in psychiatry: towards a neurological psychiatry*. Chichester.
- Rosenblum, M., Pikovsky, A., Kurths, J., Schäfer, C., & Tass, P. A. (2001). Phase synchronization: from theory to data analysis. *Handbook of biological physics*, 4, 279-321.
- Rosso, B. D. (2014). Creativity and Constraints: Exploring the Role of Constraints in the Creative Processes of Research and Development Teams. *Organization Studies*, 35, 551-585. doi:10.1177/0170840613517600.

S

- Sacheli, L. M., Tidoni, E., Pavone, E. F., Aglioti, S. M., & Candidi, M. (2013). Kinematics fingerprints of leader and follower role-taking during cooperative joint actions. *Exp Brain Res*, 226, 473-486. doi:10.1007/s00221-013-3459-7.
- Salesse, R. N., Temprado, J. J., & Swinnen, S. P. (2005). Interaction of neuromuscular, spatial and visual constraints on hand-foot coordination dynamics. *Hum Mov Sci*, 24, 66-80. doi:10.1016/j.humov.2004.12.002.
- Sawyer, R. K. (2001). *Creating conversations: Improvisation in everyday discourse*.
- Sawyer, R. K. (2003). *Improvised dialogues: Emergence and creativity in conversation*.
- Sawyer, R. K. (2004). Creative teaching: Collaborative discussion as disciplined improvisation. *Educational researcher*, 33, 12-20.
- Sawyer, R. K. (2006). Group creativity: Musical performance and collaboration. *Psychology of Music*, 34, 148-165.

- Sawyer, R. K. (2011). *Structure and improvisation in creative teaching*.
- Sawyer, R. K., & DeZutter, S. (2009). Distributed Creativity: How Collective Creations Emerge From Collaboration. *Psychology of Aesthetics Creativity and the Arts*, 3, 81-92. doi:10.1037/a0013282.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. (1988). *Motor control and learning*.
- Schmidt, R. C., Bienvendu, M., Fitzpatrick, P. A., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: coordination breakdowns and coupling strength. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 24, 884-900.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 16, 227-247.
- Schmidt, R. C., Fitzpatrick, P., Caron, R., & Mergeche, J. (2011). Understanding social motor coordination. *Hum Mov Sci*, 30, 834-845. doi:10.1016/j.humov.2010.05.014.
- Schmidt, R. C., Morr, S., Fitzpatrick, P., & Richardson, M. J. (2012). Measuring the Dynamics of Interactional Synchrony. *Journal of Nonverbal Behavior*, 36, 263-279. doi:10.1007/s10919-012-0138-5.
- Schmidt, R. C., Nie, L., Franco, A., & Richardson, M. J. (2014). Bodily synchronization underlying joke telling. *Front Hum Neurosci*, 8, 633. doi:10.3389/fnhum.2014.00633.
- Schmidt, R. C., & O'Brien, B. (1997). Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*, 9, 189-206. doi:DOI 10.1207/s15326969eco0903_2.
- Schmidt, R. C., & Richardson, M. J. (2008). Dynamics of interpersonal coordination. *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics*, 281-308. doi: 10.1007/978-3-540-74479-5_14
- Schmidt, R. C., Richardson, M. J., Arsenault, C., & Galantucci, B. (2007). Visual tracking and entrainment to an environmental rhythm. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 33, 860-870. doi:10.1037/0096-1523.33.4.860.
- Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1994). Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, 70, 369-376.
- Schöner, G., Haken, H., & Kelso, J. A. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, 53, 247-257.
- Schreiber, T. (2000). Measuring information transfer. *Phys Rev Lett*, 85, 461-464. doi:10.1103/PhysRevLett.85.461.
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action: bodies and minds moving together. *Trends Cogn Sci*, 10, 70-76. doi:10.1016/j.tics.2005.12.009.
- Sebanz, N., & Knoblich, G. (2009). Prediction in joint action: what, when, and where. *Top Cogn Sci*, 1, 353-367. doi:10.1111/j.1756-8765.2009.01024.
- Seham, A. E. (2001). *Whose improv is it anyway? Beyond Second City*.
- Shannon, C. E. (1948). A note on the concept of entropy. *Bell System Tech. J*, 27, 379-423.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of information*.

- Shinba, T., Shinozaki, T., Kariya, N., & Ebata, K. (2000). Random number generation deficit in schizophrenia characterized by oral vs written response modes. *Percept Mot Skills*, 91, 1091-1105. doi:10.2466/pms.2000.91.3f.1091.
- Shockley, K., Baker, A. A., Richardson, M. J., & Fowler, C. A. (2007). Articulatory constraints on interpersonal postural coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 33, 201-208. doi:10.1037/0096-1523.33.1.201.
- Shockley, K., Butwill, M., Zbilut, J. P., & Webber, C. L. (2002). Cross recurrence quantification of coupled oscillators. *Physics Letters A*, 305, 59-69. doi:10.1016/S0375-9601(02)01411-1.
- Shockley, K., Richardson, D. C., & Dale, R. (2009). Conversation and coordinative structures. *Top Cogn Sci*, 1, 305-319. doi:10.1111/j.1756-8765.2009.01021.x.
- Shockley, K., Santana, M. V., & Fowler, C. A. (2003). Mutual interpersonal postural constraints are involved in cooperative conversation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 29, 326-332.
- Silver, H., Shlomo, N., Schwartz, M., & Hocherman, S. (2002). Impaired visuomotor function in schizophrenic patients compared with control subjects. *J Neuropsychiatry Clin Neurosci*, 14, 72-76. doi:10.1176/jnp.14.1.72.
- Silvia, P. J., & Kaufman, J. C. (2010). *Creativity and mental illness*.
- Simonton, D. K. (1994). *Greatness : Who makes history and why*.
- Simonton, D. K. (2004). *Creativity in science: Chance, logic, genius, and zeitgeist*.
- Slowinski, P., Zhai, C., Alderisio, F., Salesse, R., Gueugnon, M., Marin, L., . . . Tsaneva-Atanasova, K. (2016). Dynamic similarity promotes interpersonal coordination in joint action. *J R Soc Interface*, 13. doi:10.1098/rsif.2015.1093.
- Sofianidis, G., Elliott, M. T., Wing, A. M., & Hatzitaki, V. (2015). Interaction between interpersonal and postural coordination during frequency scaled rhythmic sway: the role of dance expertise. *Gait Posture*, 41, 209-216. doi:10.1016/j.gaitpost.2014.10.007.
- Sofianidis, G., Hatzitaki, V., Grouios, G., Johannsen, L., & Wing, A. (2012). Somatosensory driven interpersonal synchrony during rhythmic sway. *Hum Mov Sci*, 31, 553-566. doi:10.1016/j.humov.2011.07.007.
- Spolin, V. (1999). *Improvisation for the theater: A handbook of teaching and directing techniques*.
- Sprong, M., Schothorst, P., Vos, E., Hox, J., & van Engeland, H. (2007). Theory of mind in schizophrenia: meta-analysis. *Br J Psychiatry*, 191, 5-13. doi:10.1192/bjp.bp.107.035899.
- Sternberg, R. J., Kaufman, J. C., & Pretz, J. E. (2002). *The creativity conundrum: A propulsion model of kinds of creative contributions*.
- Sternberg, R. J., & Lubart, T. I. (1995). *Defying the crowd: Cultivating creativity in a culture of conformity*.
- Stoffregen, T. A., Chen, F. C., Varlet, M., Alcantara, C., & Bardy, B. G. (2013). Getting Your Sea Legs. *PLoS One*, 8(6). doi:10.1371/journal.pone.0066949
- Stoffregen, T. A., & Riccio, G. E. (1988). An ecological theory of orientation and the vestibular system. *Psychol Rev*, 95, 3-14.

Stoffregen, T. A., Villard, S., Kim, C., Ito, K., & Bardy, B. G. (2009). Coupling of head and body movement with motion of the audible environment. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 35, 1221-1231. doi:10.1037/a0014251.

T

Thornicroft, G., Tansella, M., Becker, T., Knapp, M., Leese, M., Schene, A., . . . Group, E. S. (2004). The personal impact of schizophrenia in Europe. *Schizophr Res*, 69, 125-132.

Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. A. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proc Natl Acad Sci USA*, 104, 8190-8195. doi:10.1073/pnas.0611453104.

Tomasello, M., Carpenter, M., Call, J., Behne, T., & Moll, H. (2005). Understanding and sharing intentions: the origins of cultural cognition. *Behav Brain Sci*, 28, 675-691; discussion 691-735. doi:10.1017/S0140525X05000129.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61-78. doi:10.1175/1520-0477(1998).

Trémeau, F., Malaspina, D., Duval, F., Correa, H., Hager-Budny, M., Coin-Bariou, L., . . . Gorman, J. M. (2005). Facial expressiveness in patients with schizophrenia compared to depressed patients and nonpatient comparison subjects. *Am J Psychiatry*, 162, 92-101. doi:10.1176/appi.ajp.162.1.92.

Trevarthen, C., & Hubley, P. (1978). Secondary intersubjectivity: Confidence, confiding and acts of meaning in the first year. In A. Press. (Ed.), *Action, gesture and symbol: The emergence of language* (pp. 183-229).

Troisi, A., Spalletta, G., & Pasini, A. (1998). Non-verbal behaviour deficits in schizophrenia: An ethological study of drug-free patients. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 97.

Tschacher, W., & Ramseyer, F. (2009). Modeling psychotherapy process by time-series panel analysis (TSPA). *Psychother Res*, 19, 469-481. doi:10.1080/10503300802654496.

Tschacher, W., Rees, G. M., & Ramseyer, F. (2014). Nonverbal synchrony and affect in dyadic interactions. *Frontiers in Psychology*, 5. doi:10.3389/fpsyg.2014.01323.

Tyler, S. A., & Tyler, M. G. (1990). *Foreword. Improvisational Therapy*.

V

Valdesolo, P., & Desteno, D. (2011). Synchrony and the social tuning of compassion. *Emotion*, 11, 262-266. doi:10.1037/a0021302.

Valdesolo, P., Ouyang, J., & DeSteno, D. (2010). The rhythm of joint action: Synchrony promotes cooperative ability. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46, 693-695. doi:10.1016/j.jesp.2010.03.004.

- van Baaren, R. B., Holland, R. W., Kawakami, K., & van Knippenberg, A. (2004). Mimicry and prosocial behavior. *Psychological Science*, 15, 71-74. doi:DOI 10.1111/j.0963-7214.2004.01501012.x.
- van Baaren, R. B., Holland, R. W., Steenaert, B., & van Knippenberg, A. (2003). Mimicry for money: Behavioral consequences of imitation. *Journal of Experimental Social Psychology*, 39, 393-398. doi:10.1016/S0022-1031(03)00014-3.
- 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. *Neurosci Lett*, 432, 88-93. doi:10.1016/j.neulet.2007.11.070.
- Varela, F., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind: Cognitive mind and human experience*.
- Varlet, M., Coey, C. A., Schmidt, R. C., & Richardson, M. J. (2012). Influence of stimulus amplitude on unintended visuomotor entrainment. *Hum Mov Sci*, 31(3), 541-552. doi:10.1016/j.humov.2011.08.002.
- Varlet, M., Marin, L., Lagarde, J., & Bardy, B. G. (2011). Social postural coordination. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 37, 473-483. doi:10.1037/a0020552.
- Varlet, M., Marin, L., Raffard, S., Schmidt, R. C., Capdevielle, D., Boulenger, J. P., . . . Bardy, B. G. (2012). Impairments of social motor coordination in schizophrenia. *PLoS One*, 7, e29772. doi:10.1371/journal.pone.0029772.
- Varlet, M., & Richardson, M. J. (2011). Computation of continuous relative phase and modulation of frequency of human movement. *J Biomech*, 44, 1200-1204. doi:10.1016/j.jbiomech.2011.02.001.
- Varlet, M., Stoffregen, T. A., Chen, F. C., Alcantara, C., Marin, L., & Bardy, B. G. (2014). Just the sight of you: postural effects of interpersonal visual contact at sea. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 40, 2310-2318. doi:10.1037/a0038197.
- Vera, D., & Crossan, M. (2005). Improvisation and innovative performance in teams. *Organization Science*, 16, 203-224.
- Vicente, R., Wibral, M., Lindner, M., & Pipa, G. (2011). Transfer entropy--a model-free measure of effective connectivity for the neurosciences. *J Comput Neurosci*, 30, 45-67. doi:10.1007/s10827-010-0262-3.
- Vinciarelli, A., Pantic, M., & Bourlard, H. (2009). Social signal processing: Survey of an emerging domain. *Image and Vision Computing*, 27, 1743-1759. doi:10.1016/j.imavis.2008.11.007.
- von Holst, E. (1937/1973). On the nature of order in the central nervous system. In I. E. v. H. (Ed.) (Ed.), *The behavioral physiology of animals and man: selected papers*. Miami: Miami university press.

W

- Wallas, G. (1926). *The art of thought*.
- Walton, A. E., Richardson, M. J., Langland-Hassan, P., & Chemero, A. (2015). Improvisation and the self-organization of multiple musical bodies. *Front Psychol*, 6, 313. doi:10.3389/fpsyg.2015.00313.
- Washburn, A., DeMarco, M., de Vries, S., Ariyabuddhiphongs, K., Schmidt, R. C., Richardson, M. J., & Riley, M. A. (2014). Dancers entrain more effectively than non-dancers to another actor's movements. *Front Hum Neurosci*, 8, 800. doi:10.3389/fnhum.2014.00800.
- Waters, E., & Cummings, E. M. (2000). A secure base from which to explore close relationships. *Child Dev*, 71, 164-172.
- Weick, K. E. (1998). Introductory essay—Improvisation as a mindset for organizational analysis. *Organization Science*, 9, 543-555.
- Weiser, M., Werbeloff, N., Vishna, T., Yoffe, R., Lubin, G., Shmushkevitch, M., & Davidson, M. (2008). Elaboration on immigration and risk for schizophrenia. *Psychol Med*, 38, 1113-1119. doi:10.1017/S003329170700205X.
- Wiener, N. (1948). Time, Communication, and the Nervous System. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 50, 197-220.
- Wiener, N. (1956). The theory of prediction. *Modern mathematics for engineers*, 1, 125-139.
- Wiltermuth, S. S., & Heath, C. (2009). Synchrony and cooperation. *Psychological Science*, 20, 1-5. doi:10.1111/j.1467-9280.2008.02253.x.
- Wing, L., & Gould, J. (1979). Severe impairments of social interaction and associated abnormalities in children: epidemiology and classification. *J Autism Dev Disord*, 9, 11-29.
- Wittchen, H. U., Fuetsch, M., Sonntag, H., Muller, N., & Liebowitz, M. (2000). Disability and quality of life in pure and comorbid social phobia. Findings from a controlled study. *Eur Psychiatry*, 15, 46-58.
- Wright, I. C., Rabe-Hesketh, S., Woodruff, P. W., David, A. S., Murray, R. M., & Bullmore, E. T. (2000). Meta-analysis of regional brain volumes in schizophrenia. *Am J Psychiatry*, 157, 16-25. doi:10.1176/ajp.157.1.16.

Z

- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 18, 403-421.
- Zanone, P. G., & Kostrubiec, V. (2004). Searching for (dynamic) principles of learning *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 55-89): Springer Berlin Heidelberg.

- Zanone, P. G., Kostrubiec, V., Albaret, J. M., & Temprado, J. J. (2010). Covariation of attentional cost and stability provides further evidence for two routes to learning new coordination patterns. *Acta Psychol*, 133, 107-118. doi:10.1016/j.actpsy.2009.10.006.
- Zhai, C., Alderisio, F., Slowinski, P., Tsaneva-Atanasova, K., & di Bernardo, M. (2016). Design of a Virtual Player for Joint Improvisation with Humans in the Mirror Game. *PLoS One*, 11, e0154361. doi:10.1371/journal.pone.0154361.
- Zhai, C., Alderisio, F., Tsaneva-Atanasova, K., & di Bernardo, M. (2014). A Novel Cognitive Architecture for a Human-like Virtual Player in the Mirror Game. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (Smc)*, 754-759.
- Zhao, Z., Salesse, R. N., Gueugnon, M., Schmidt, R. C., Marin, L., & Bardy, B. G. (2015). Moving attractive virtual agent improves interpersonal coordination stability. *Hum Mov Sci*, 41, 240-254. doi:10.1016/j.humov.2015.03.012.
- Zivotofsky, A. Z., & Hausdorff, J. M. (2007). The sensory feedback mechanisms enabling couples to walk synchronously: an initial investigation. *J Neuroeng Rehabil*, 4, doi:10.1186/1743-0003-4-28.

Improvisation socio-motrice : quels impacts sur le comportement moteur ?

Résumé. Ce travail de thèse étudie l'improvisation socio-motrice entre deux personnes. Nos capacités d'improvisation reflètent notre faculté à interagir avec autrui en adaptant nos réponses comportementales à celles de l'autre. Deux paramètres rendent compte de ces capacités : la créativité motrice, c'est-à-dire la richesse des mouvements, et la coordination interpersonnelle. Bien que fondamentales dans le succès de nos interactions sociales, leur investigation conjointe, jamais réalisée, semble nécessaire. Le but de cette thèse était donc d'investiguer les comportements moteurs inter- et intra-personnels en situation d'improvisation. Pour cela, nous avons d'abord : (i) recueilli et défini les méthodes d'analyse de la créativité motrice et de la coordination, (ii) analysé les capacités d'improvisation et leur acquisition, (iii) mesuré l'effet de l'improvisation sur l'organisation posturale de chacun, et finalement (iv) évalué les capacités d'improvisation en présence d'un déficit d'interaction sociale (associé à la schizophrénie). Pris ensemble, nos résultats indiquent que l'improvisation socio-motrice est un bon témoin de nos interactions sociales. Nous montrons précisément que les capacités d'improvisation permettent de discriminer un individu sain d'un individu souffrant de déficit social. La coordination interpersonnelle semble jouer un rôle fondamental, aussi bien dans l'acquisition de l'improvisation que dans la stabilité posturale qui la soutient. Ces résultats sont discutés à travers l'approche des patrons dynamiques de coordination. Nous proposons un modèle simplifié de l'improvisation intégrant la coordination et la créativité. Nos conclusions offrent des perspectives permettant de mieux comprendre et améliorer nos interactions sociales, en présence ou non de désordres sociaux.

Mots-clés : *Improvisation, Interaction sociale, Coordinations intra- et interpersonnelle, Créativité motrice, Coordination posturale, Schizophrénie.*

Socio-motor improvisation: what are its impacts on motor behavior?

Abstract. This work investigates the socio-motor improvisation that occurs between two people. Improvisation capacities rely on our ability to interact with others by adapting our own behavioral answers to those of the other. Two parameters display these capacities: motor creativity (i.e., the richness of our movements) and interpersonal coordination. Although these two parameters are fundamental in the success of social interaction, they were never investigated jointly. This was the goal of our thesis. We aimed to explore intra- and interpersonal motor behaviors during improvisation. To do so, (i) we reviewed existing methods analyzing creativity and coordination, and proposed new ones, (ii) we measured improvisation capacities and their possible acquisition, (iii) we evaluated the influence of improvisation on postural organization of each person and (iv) we assessed the ability to improvise in presence of social deficits (associated with schizophrenia). Taken together, our results demonstrate that socio-motor improvisation is a good candidate to capture our social interactions. More precisely, we show that such capacities could discriminate healthy people from patients suffering from social deficits. Interpersonal coordination seems fundamental since it improves improvisation capacities and postural stability during social interaction. These results are discussed in the conceptual framework of the dynamical approach to movement coordination. We propose a simplified model of socio-motor improvisation including creativity and coordination. Finally, our conclusions offer new perspectives for the understanding and the improvement of social interactions, in presence or not of social disorders.

Keywords: *Improvisation, Social interaction, Intra- and interpersonal coordination, Motor creativity, Postural coordination, Schizophrenia.*