

UNIVERSITE DE BOURGOGNE

UFR Sciences Humaines

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Bourgogne
Discipline : Psychologie

par

Mathieu Peckel

le 15 Décembre 2014

Le lien réciproque entre musique et mouvement étudié à
travers les mouvements induits par la musique

Directeur de thèse

Emmanuel Bigand

Co-directeur de thèse

Thierry Pozzo

Constitution du jury

Simone Dalla Bella, Pr. (Université de Montpellier 1, France), Rapporteur

Hanna Chainay, MCF (Université Lumière Lyon 2, France), Rapporteur

Marc Leman, Pr. (Université de Gand, Belgique), Examineur

France Mourey, MCF (Université de Bourgogne, France), Examineur

© Mathieu Peckel, 2014

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier l'ensemble de mes collègues du LEAD. Merci à tout ceux qui m'ont aidé à mener à bien mon projet aussi bien techniquement, qu'humainement. Merci à Philippe, Laurent et Patrick pour le côté technique! Un merci particulier à Sandrine et Corinne qui m'ont souvent vu débarquer dans leur bureau respectif avec des papiers à faire signer pour la veille. Merci pour votre patience et votre efficacité! Merci également à Alessandro, Maxime, Helle, Élodie, Aurélie, Lucie, Olivier (x2), Arnaud, Aurélia, Laurent, Pierre et à tous ceux que j'ai pu oublier d'avoir contribué à cette géniale ambiance de travail au LEAD et tous les bons moments que nous avons passés ensemble. Un merci particulier à Christopher et Céline pour leur contribution à l'amélioration de mon anglais!

J'ai également eu la chance de faire la rencontre de Laura, Lolita, Luc, Yannick, Stéphane, Radka, Christophe et Chris qui en plus d'être des collègues géniaux ont été ou sont toujours des amis fantastiques! Merci à vous tous pour les bières, les concerts, les soirées, les apéros, les rigolades et d'avoir été là dans les moments parfois un peu plus difficiles. Merci pour votre bonne humeur et votre soutien. Merci beaucoup. En espérant vous revoir tous bientôt!

Je tiens également à remercier tous les membres du STAPS qui m'ont aidé dans ma recherche et ont mis à ma disposition des connaissances et techniques qui me serviront encore de nombreuses années pendant ma carrière, je l'espère. Merci à Jean-Yves, Yves, Cyril, Christos ainsi qu'aux doctorants du STAPS qui ont été très accueillants.

Un grand merci à tous mes participants bien entendu, sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Je tiens à remercier tous les membres de l'Expérimentarium qui m'ont donné goût à la valorisation scientifique et à la vulgarisation scientifique. Un merci tout particulier à Élise, Lionel et Candice. Merci pour ces quatre années d'ateliers, de restaurants et bonne humeur!

J'aimerais également remercier les personnes qui m'ont orienté vers la recherche lorsque j'étais encore en Belgique: Dennis Küster, Virginie Crollen, Pascale Lidji, Steven Livingstone, Dominique Morsomme et tous les autres. Un merci tout particulier à Régine Kolinsky sans qui je n'aurais sans doute jamais fait cette thèse à Dijon. Une pensée tout particulière également à Nicolas Vermeulen pour m'avoir soutenu dans mon projet de recherche sur la musique que j'ai continué à travers cette thèse et pour m'avoir donné le goût de la recherche.

Je ne peux bien sûr pas oublier les amis que j'ai dû laisser en Belgique en partant pour Dijon pour ma thèse. Je tiens donc à remercier Laurane, Larissa, Claudia, Coralie, Mathieu et Nicolas qui ont su rester proches malgré la distance qui nous séparait. Une pensée toute particulière pour Arnaud qui n'a cessé de m'encourager, de m'écouter, de me faire rire, bref d'être là malgré la distance. Merci fieu.

Je tiens bien sûr à remercier tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu pendant ces quatre années et qui ont cru en moi. Un message particulier pour ma maman qui s'est inquiétée pendant toutes ces années à chaque étape importante de ma thèse. Rassure-toi, c'est derrière moi maintenant! Merci encore à vous tous pour votre soutien.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans bien entendu remercier mes deux co-directeurs de thèse. Merci Emmanuel pour ta guidance, ton soutien, tes précieux conseils et surtout de m'avoir transmis ta passion pour la recherche. Merci également à M. Pozzo de m'avoir ouvert les portes de votre laboratoire et d'avoir partagé avec moi votre savoir sur un domaine que je maîtrisais très peu. L'expérience et les connaissances que j'ai pu acquérir grâce à vous deux pendant ces quatre années sont inestimables et je vous en remercie.

Résumé

La musique et le mouvement sont inséparables. Les mouvements produits spontanément lors de l'écoute musicale seraient le reflet d'un lien étroit entre le système perceptif et moteur. Ce lien est l'objet d'étude de cette thèse. Une première approche concernait l'impact des mouvements induits par la musique sur la cognition musicale. Dans deux études, nous montrons que bouger en rythme sur la musique n'améliore ni la rétention de nouveaux morceaux de musique (Etude 1) ni la rétention d'informations contextuelles relatives à leur encodage (Etude 2). Les résultats de ces deux études suggèrent la superficialité du traitement inhérent à l'expression des affordances musicales nécessaire à la production de mouvements induits par la musique dans la tâche motrice ainsi qu'un traitement moteur automatique de la musique indépendamment de la tâche. L'importance du groove musical a également été mise en évidence. Une deuxième approche concernait l'influence de la perception de rythmes musicaux sur la production de mouvements rythmiques. Notre troisième étude testait l'hypothèse selon laquelle les membres du corps seraient influencés de manière différente en fonction du tempo musical. Les résultats montrent que la tâche de tapping était la plus influencée par la perception de rythmes musicaux. Ceci serait dû à la nature similaire de la pulsation musicale et des mécanismes de timing impliqués dans le tapping ainsi qu'à des phénomènes de résonance motrice. Nous avons également observé la mise en place de certaines stratégies face à la tâche. L'ensemble de ces résultats est discuté à la lumière du lien entre perception et action, de la cognition musicale incarnée et des affordances musicales.

Mots-clés: musique, mémoire, mouvements, cognition musicale incarnée, affordances musicales, groove, perception musicale, mouvements rythmiques, résonance motrice, capture de mouvement

Abstract

Music and movement are inseparable. The movements that are spontaneously produced when listening to music are thought to be related to the close relationship between the perceptual and motor system in listeners. This particular link is the main topic of this thesis. A first approach was focused on the impact of music-induced movements on music cognition. In two studies, we show that moving along to music neither enhances the retention of new musical pieces (Study 1) nor the retention of the contextual information related to their encoding (Study 2). These results suggest a shallow processing inherent to the expression of musical affordances required for the production of music-induced movements in the motor task. Moreover, they suggest that music is automatically processed in a motoric fashion independently of the task. Our results also brought forward the importance of the musical groove. A second approach focused on the influence of the perception of musical rhythms on the production of rhythmic movements. Our third study tested the hypothesis that different limbs would be differentially influenced depending on the musical tempo. Results show that the tapping task was the most influenced by the perception of musical rhythms. We argued that this would come from the similar nature of the musical pulse and the timing mechanisms involved in the tapping task and motor resonance phenomena. We also observed different strategies put in place to cope with the task. All these results are discussed in light of the link between perception and action, embodied musical cognition and musical affordances.

Keywords: music, memory, movements, embodied musical cognition, musical affordances, groove, music perception, rhythmic movements, motor resonance, motion capture

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Abstract	vii
Table des matières	ix
Liste des tableaux	xiii
Liste des figures	xiv
Liste des annexes	xv

Introduction	1
PARTIE THEORIQUE	7
Chapitre 1 : De la cognition a-modale à la cognition incarnée	9
1.1 Conception classique de la cognition	9
1.1.1 La naissance du cognitivisme	9
1.1.2 Nature de l'information et son traitement.....	10
1.2 Critique et évolution des théories classiques	11
1.2.1 Problème de l'a-modalité	11
1.2.2 Evolution connexionniste	12
1.3 La cognition incarnée	13
1.4 La découverte des neurones miroirs	17
1.5 Le cycle perception-action.....	20
1.6 Théories écologiques de la perception.....	24
Chapitre 2: La perception musicale comme système de traitement d'information	29
2.1 Conception classique de la perception musicale	29
2.1.1 Chez les cognitivistes	29
2.1.2 La perception des structures musicales.....	31
2.2 Synchronisation sensorimotrice.....	32
2.2.1 Considérations générales	32

2.2.2 Perturbations et mécanismes de correction.....	34
2.2.3 Mouvements discrets et continus.....	36
2.2.4 Synchronisation sensorimotrice en musique.....	37
Chapitre 3: La cognition musicale est incarnée.....	41
3.1 La cognition musicale incarnée	41
3.2 Le cycle perception-action en musique	45
3.2.1 Résonance motrice.....	46
3.2.2 Résonance perceptive	48
3.3 La musique donne envie de bouger	50
3.3.1 Le groove ou l'envie de bouger en musique	50
3.3.2 Les affordances musicales	52
Objectifs de la thèse et Hypothèses	57
Première partie.....	57
Etude 1: Comment la production de mouvements induits par la musique influence la rétention de nouveaux morceaux de musique.....	57
Etude 2: Comment la production de mouvements induits par la musique influence la rétention d'informations contextuelles liées à l'encodage	58
Deuxième partie.....	59
Etude 3: Comment la perception musicale influence la production de mouvements rythmiques	59
 PARTIE EXPÉRIMENTALE	 61
Première étude : How does moving along to music influence its later recognition?	63
1. Introduction	65
2. Method.....	70
2.1 Participants	70
2.2 Material.....	71
2.3 Procedure	71
3. Results	72
4. Discussion.....	75

Deuxième étude: How does moving along to music influence item and source memory for music?..... 81

Abstract.....	81
1. Introduction	82
2. Method.....	85
2.1 Participants	85
2.2 Material.....	86
2.3 Procedure	86
3. Results	87
4. Discussion.....	88

Troisième étude: The impact of the perception of rhythmic music on self-paced oscillatory movements..... 93

1. Introduction	94
2. Study One	97
2.1 Introduction	97
2.2 Materials and Methods	98
2.2.1 Participants	98
2.2.2 Apparatus.....	98
2.2.3 Procedure	98
2.3 Results	100
2.3.1 Data processing.....	100
2.3.2 Comparison between oscillatory movements.....	100
2.3.3 Comparison between walking frequency and other movements.....	101
2.4 Discussion.....	102
3. Study Two.....	102
3.1 Introduction	102
3.2 Material and Methods	103
3.2.1 Participants.....	103
3.2.2 Apparatus.....	103
3.2.3 Material.....	103
3.2.4 Procedure	104
3.3 Results	105

3.3.1 Data processing.....	105
3.3.2 Are movements performed in silence comparable between Study One and Study Two?.....	105
3.3.3 Were participants influenced by the music starting, stopping or throughout the experiment?	106
3.3.4 How did participants react throughout the experiment in terms of strategies?	108
3.3.5 How did participants subjectively rate different moments in the experiment?	111
3.4 Discussion.....	112
4. General discussion	115
Discussion générale	119
Quelle influence exercent les mouvements induits par la musique sur la cognition musicale?	120
Bouger en musique améliore-t-il la mémorisation d'un morceau ?	121
Bouger en rythme sur la musique améliore-t-il la rétention d'informations contextuelles liées à l'encodage d'un morceau?	125
Focaliser l'attention des participants sur la production de mouvements liés à certaines caractéristiques musicales améliore-t-il la reconnaissance spécifique de certains morceaux ?..	125
Quelle influence exercent les rythmes musicaux sur la production de mouvements rythmiques spontanés?.....	127
Comment sont organisés les mouvements rythmiques d'oscillation produits spontanément?....	128
Comment interagissent les mouvements rythmiques d'oscillation produits spontanément et la pulsation musicale?.....	128
Applications.....	131
Conclusions et perspectives.....	133
Bibliographie.....	135
Annexes	161
Tracks List and Starting Points of 30-second Excerpts	162
Composition of the six songs using Garage Band	163
Table of the criteria used to determine the different patterns	164

Liste des tableaux

Table 1: Sensibility indices (d') and correct response rate (%) of task and side encoding contexts.....	88
Table 1: Statistical differences between the five oscillatory movements (one-tailed t-tests)	101
Table 2: Comparison of movements' tempo performed in silence depending on the study .	106
Table 3: Mean variation (%) across participants between movement tempi for the three indices.....	107
Table 4: Number of participants expressing a specific behavioral pattern during a recording session for each movement.	111

Liste des figures

Figure 1. Mean d' scores for each condition and each distractor type.....	73
Figure 2. Hit Rates and False Positive Rates (FPR) for each condition and distractor type...	74
Figure 1. Location of the markers and performed movements.	99
Figure 2. Comparison between the six movements performed during the experiment.....	101
Figure 3. Examples of behavioral patterns found in the experiment.....	109

Liste des annexes

Tracks List and Starting Points of 30-second Excerpts.....	162
Composition of the six songs using Garage Band.....	163
Table of the criteria used to determine the different patterns.....	164

Introduction

La musique est intrinsèquement liée au mouvement. Produire de la musique requiert l'utilisation de mouvements et des mouvements sont souvent spontanément produits en écoutant de la musique (Keller et Rieger, 2009; Clarke, 2005). En effet, écouter de la musique nous donne envie de bouger, que ce soit de manière volontaire et consciente dans une boîte de nuit ou de manière spontanée en écoutant la radio par de subtils mouvements de tête. Comme l'ont suggéré Lesaffre et al. (2008), la plupart des auditeurs interrogés rapportent bouger de manière spontanée en écoutant de la musique. La musique semble posséder une qualité quasi irrésistible qui nous donne envie de bouger, connue sous le nom de *groove* (e.g. Madison, 2006; Janata, Tomic, & Haberman, 2012). Cette inclination à bouger en musique serait le reflet d'un lien privilégié entre la musique et le système moteur des auditeurs (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007; Clarke, 2005). De nombreuses études en neuroscience ont en effet démontré une interaction entre les zones cérébrales motrices et auditives: écouter de la musique active les zones cérébrales motrices (e.g. Bangert et al., 2006; Stupacher, Hove, Novembre, Schütz-Bosbach, & Keller, 2013). De la même manière, bouger en rythme avec la musique semble également avoir un impact sur sa perception (e.g. Phillips-Silver, & Trainor, 2007).

L'étude des mouvements induits par la musique lors de l'écoute musicale est une préoccupation récente en psychologie et a été facilitée par l'avènement de nouvelles théories sur l'incarnation de la cognition musicale ainsi que de nouvelles technologies (Leman, 2008). La recherche sur les mouvements induits par la musique s'accorde sur le fait que ceux-ci sont produits en accord avec la structure musicale et plus spécifiquement avec son unité de base, la pulsation musicale (ou *beat*) (e.g. Toiviainen, Luck, & Thompson, 2010). De plus, comme le suggèrent les théories sur les affordances musicales (i.e. le support à l'action que la musique peut fournir), l'accès au potentiel moteur inhérent à la musique (son *groove*) permettrait aux auditeurs de bouger en rythme avec elle sans difficulté (i.e. mouvements induits par la musique).

L'objet d'étude de ce travail de thèse concerne dès lors deux aspects des mouvements induits par la musique. Un des aspects les moins connus de ces mouvements concerne leur impact sur les processus cognitifs de haut niveau. Un premier but que se fixe cette thèse est dès lors une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs mis en jeu lors de la production de ces mouvements pendant l'écoute musicale. L'autre aspect étudié dans cette thèse concerne les mécanismes sous-tendant la production de ces mouvements. Malgré une littérature riche sur le lien entre perception et action, la façon dont la musique évoque des mouvements chez les auditeurs reste mal comprise. Ce travail de thèse se fixe ainsi comme second objectif une meilleure compréhension des mécanismes moteurs inhérents à la production de mouvements induits par la musique. Plus précisément, l'approche choisie consiste à étudier comment la perception musicale influence la production de mouvements rythmiques. L'étude des mouvements induits par la musique est donc double : cognitive et motrice.

La partie théorique de cette thèse commence par faire un pas en arrière afin de présenter de manière succincte l'évolution des concepts liés à cognition humaine. Dans un

premier temps, nous exposerons comment les cognitivistes ont proposé d'expliquer le fonctionnement de l'esprit humain en s'appuyant sur la métaphore d'un cerveau traitant l'information de manière amodale, à l'image d'un ordinateur. Dans un second temps, les critiques qui ont été émises à l'égard de cette conception ont notamment donné lieu à l'avènement d'une nouvelle conception de la cognition : la cognition incarnée. Cette vision de l'esprit humain se caractérise par une prise en compte de l'intégration de facteurs moteurs, sensoriels, émotionnels et situationnels dans la cognition. Parallèlement, la découverte des neurones miroirs (Gallese et al., 1996) a renforcée l'idée selon laquelle la perception et l'action étaient deux éléments indissociables dans la cognition humaine. Finalement, ce premier chapitre détaillera également deux approches traitant spécifiquement de ce lien entre perception et action.

Influencé par les théories cognitivistes dominantes de l'époque, certains chercheurs se sont penchés sur les représentations mentales inhérentes à la musique et plus particulièrement à sa perception. Le deuxième chapitre présente dans un premier temps la vision cognitive de la perception musicale. Celle-ci suggère, par analogie au langage, une compréhension de la musique par l'intermédiaire d'une grammaire musicale. Cette grammaire déterminerait la façon dont les différentes structures musicales sont perçues. Dans un deuxième temps, nous verrons en quoi la perception musicale ne peut se soustraire d'un élément moteur. Comme l'ont montré plusieurs recherches, la perception des structures musicales serait avant tout une construction psychologique subjective, propre à chaque individu (e.g. Lerdahl et Jackendoff, 1983). Poussé par la nécessité de mesurer objectivement cette perception, un certain nombre de recherches se sont dès lors orienté vers des tâches de synchronisation sensorimotrice. Cette synchronisation sensorimotrice serait une porte d'entrée à la compréhension des mécanismes sous-jacents à la perception musicale.

Confrontées aux mêmes critiques que les théories cognitives classiques, les théories relatives à la cognition musicale ont évoluées ces dernières années en tenant compte des déterminants environnementaux et corporels de la phénoménologie de l'expérience musicale (Leman, 2008). Cette nouvelle approche nommée *cognition musicale incarnée* est le sujet du troisième chapitre. Nous verrons en quoi ces nouvelles théories surmontent certains obstacles rencontrés par les théories cognitivistes et en quoi elles élargissent la recherche sur la musique en proposant de nouvelles perspectives sur la perception et la compréhension de la musique (Leman, 2008). Ensuite, nous présenterons en quoi les théories sur le lien entre perception et action s'appliquent au domaine de la musique et en quoi elles permettent d'expliquer les mouvements induits par la musique. Finalement, nous discuterons la notion de groove musical qui correspond à l'envie de bouger en rythme avec la musique qu'un auditeur peut éprouver.

Nous terminerons cette partie théorique en exposant les objectifs et les hypothèses testées dans ce travail de thèse. L'expérimentation réalisée se divise en deux grandes parties relatives à l'interaction réciproque entre musique et mouvement. Les études relatives à ces deux parties sont présentées sous forme d'articles. La réciprocité du lien entre musique et mouvement se manifeste donc dans les deux approches envisagées. Dans une première partie expérimentale, nous testons les implications cognitives des mouvements produits

spontanément en musique dans le cadre d'un encodage en mémoire de morceaux de musique nouveaux (Étude 1¹ et Étude 2). Dans une deuxième partie, nous étudions l'influence de la perception de rythmes musicaux sur la production de mouvements rythmiques spontanés (Étude 3²). Finalement, une discussion générale récapitule les principaux résultats obtenus et les explique à la lumière des théories et résultats expérimentaux actuels sur le lien entre perception et action, la cognition musicale incarnée et les affordances musicales. La discussion générale se termine en formulant les applications et les limites de ce travail ainsi que les perspectives qu'il offre.

¹ (Peckel, & Bigand, in press). Voir Bibliographie.

² (Peckel, Pozzo, & Bigand, 2014). Voir Bibliographie.

PARTIE THEORIQUE

Chapitre 1 : De la cognition a-modale à la cognition incarnée

1.1 Conception classique de la cognition

1.1.1 La naissance du cognitivisme

Historiquement, le courant cognitivisme fait suite au courant behavioriste qui postule l'absence de contenus ou de mécanismes mentaux internes (Watson, 1930). Ainsi, le behaviorisme base son analyse du comportement humain uniquement sur les comportements observables (Doyle, 2000). Le chercheur behavioriste se contente dès lors d'étudier le lien entre un stimulus et une réponse donnée par le sujet. Selon les behavioristes, ce qui se trouve entre le stimulus et la réponse n'a pas d'importance car il est impossible de l'observer, empêchant ainsi de l'étudier. De la même manière, selon Skinner (1957), à peu près toutes les formes du comportement humain, en plus de l'apprentissage, pourraient s'expliquer par les comportements manifestés en réaction à l'environnement. Selon Skinner, l'activité d'un organisme serait dépendante de conditionnements et le comportement humain pourrait ainsi être étudié de manière indirecte en observant l'animal. La notion de conditionnement implique que tout comportement peut être consolidé ou affaibli en fonction du renforcement qui lui est associé. Les comportements des individus ne seraient donc que des réactions à des stimuli externes; ces réactions étant apprises par conditionnement. Certains behavioristes ont cependant osé regarder ce qui se trouvait entre la perception d'un stimulus et la production de la réponse appropriée. C'est le cas par exemple d'Edward Tolman, behavioriste de la première heure. Il soutenait que ni le comportement humain ni animal ne pouvaient se comprendre en omettant le but et l'orientation du comportement. Tolman (1932) suggérait que tous les comportements étaient dirigés vers un certain but qui allait déterminer le choix de la réponse.

La transition du behaviorisme vers le cognitivisme s'est faite notamment grâce à l'apport de la psychobiologie (Sternberg, 2009). Karl Spencer Lashley, par exemple, un des premiers étudiants de Watson fut parmi les premiers à réclamer la nécessité pour la psychologie de dépasser le behaviorisme. Mettant en avant la complexité de l'esprit et du cerveau humain, il suggéra d'étudier des thèmes qui ne sont pas simplement explicables par un conditionnement. Lashley (1951) proposa que le cerveau, contrairement à ce que les behavioristes soutenaient, était un organe essentiel dans la compréhension du comportement. Il s'efforça de comprendre comment l'organisation cérébrale rendait possible l'exécution de tâches aussi complexes que la production de musique ou l'utilisation du langage. Selon lui, aucune de ces activités ne pouvaient s'expliquer par un simple conditionnement.

Un autre chercheur dont les travaux ont stimulé l'apparition du cognitivisme est Donald Hebb (1949). Il fut le premier à fournir une théorie sur les mécanismes cérébraux à même de soutenir les processus cognitifs. Sa plus grande contribution fut la notion d'assemblées de cellules. Ces assemblées de cellules nerveuses sont des structures neurales coordonnées qui se développent par des stimulations fréquentes et sous-tendraient l'apprentissage dans le cerveau. Selon ce principe, une représentation mentale serait dès lors une structure de neurones interconnectés dont les connexions ont été renforcées au fil de

l'apprentissage. Chaque partie qui constitue un souvenir serait représentée par un ensemble plus ou moins grand de structures neuronales connectées les unes aux autres.

De manière intéressante, au delà des développements scientifiques, la technologie a également inspiré les théories cognitivistes. Le courant cognitiviste est apparu en même temps que le développement des premiers ordinateurs dans les années 1950. Ainsi, les développements technologiques ont commencé à exercer une influence sur la façon dont les psychologues percevaient l'esprit humain. La compréhension de la façon dont un ordinateur fonctionne a donné lieu à la création de modèles de la cognition humaine. Selon les cognitivistes et les premiers chercheurs dans le domaine de l'informatique, l'esprit humain et l'ordinateur ont en commun le fait qu'ils sont des machines à traiter de l'information. Cette métaphore cerveau-ordinateur pose cependant un problème : le niveau de traitement. A quel niveau doit-on se placer pour décrire les phénomènes cognitifs ? Plus précisément, le problème est lié aux limites imposées aux deux systèmes, tant informatique que cognitif (i.e. le cerveau humain). Comme suggéré par Hebb (1949), l'étude des structures cérébrales au niveau physiologique (i.e. chaque cellule nerveuse et leur interaction) serait un point de départ intéressant dans l'étude de la cognition mais s'avère beaucoup trop complexe. De la même manière, les systèmes informatiques ont des limitations techniques contraignant leur fonctionnement. Ces limites ont obligé les chercheurs à imaginer un système cognitif offrant un compromis entre la complexité et les ressources qu'il requiert.

1.1.2 Nature de l'information et son traitement

La nature de l'information traitée par le système cognitif a été une préoccupation majeure pour les cognitivistes. Dans le prolongement de la métaphore cerveau-ordinateur, l'information est vue comme étant abstraite, symbolique. Ainsi, les informations extraites de l'environnement sont transformées au niveau de nos organes sensoriels avant d'être synthétisées en objets mentaux. Ce phénomène est connu sous le nom de "transduction". Les informations sensorielles arrivent sous leur forme modale (i.e. vision, audition, toucher, etc.) à travers les différents systèmes perceptifs et sont codés sous une forme amodale, symbolique. Les symboles sont donc des *représentations* du monde externe. Ces représentations amodales prennent une forme proche du langage propositionnel, sous forme de mot (Fodor, 1975). Ainsi, la perception de la couleur rouge sera codée sous la forme du mot "*rouge*". De plus, les concepts plus complexes sont représentés sous forme de réseaux sémantiques, de liste de propriétés, de schémas et de propositions. Par exemple, une pomme rouge va être codée par plusieurs propriétés : *pomme, rouge, rond, sucré, appétissant*, etc. qui vont pouvoir décrire avec beaucoup de détails l'expérience vécue. A mesure que les connaissances sur une situation augmentent, les concepts associés à cette situation s'organisent sous forme de structures de plus en plus complexes. A cet égard, le cognitivisme prône un dualisme entre le corps et l'esprit. Les symboles sont totalement détachés de leur nature perceptive (Morsella, Lanska, Berger, & Gazzaley, 2009; Zwaan, 2009) et corporelle. Cette dualité se retrouve également dans le domaine de l'informatique où le hardware est indépendant du software (Block 1995, Dennett, 1969). Le hardware correspondrait au corps et le software correspondrait à l'esprit. Dans les théories cognitivistes, le corps est vu comme une machine à

percevoir et à produire des réponses. En d'autres mots, le corps perçoit, l'esprit traite l'information, raisonne, décide et envoie des commandes motrices au corps afin de donner une réponse.

Selon les cognitivistes, l'esprit humain est donc un dispositif qui manipule des symboles sensés représenter les caractéristiques du monde extérieur (Newell & Simon, 1972; Pylyshyn, 1984). La cognition consiste à opérer sur ces représentations mentales (amodales) des traitements similaires à ceux dont un ordinateur est capable de réaliser (Varela et al. 1999). Ces opérations sont proches de celles de la logique formelle comme l'inférence, la catégorisation ou la comparaison. De plus, ces opérations se font à partir de modèles dont les règles sont établies par avance, par d'autres représentations qui prédisent la transformation de l'entrée (input) en sortie (output). Selon Atkinson et al. (2000), ces règles sont appliquées aux symboles afin de simuler la façon dont l'esprit fonctionne (perception, mémoire, raisonnement). Alors que les behavioristes ne s'intéressaient qu'à la perception d'un stimulus et à l'action qui en découlait (S-R), les cognitivistes ont été plus loin en étudiant le chemin parcouru par l'information.

En résumé, il est possible de caractériser le système cognitif proposé dans le courant cognitiviste en deux points principaux. Tout d'abord, le système cognitif est un système de traitement de l'information actif. Il n'enregistre pas les informations passivement mais les manipule et les transforme en représentations mentales amodales sous forme propositionnelle. Ensuite, l'information est traitée par une succession de processus cognitifs (encodage, stockage, récupération) mis en œuvre de manière séquentielle, à l'image d'un processeur informatique. Ces processus sont proches des opérations réalisées en logique formelle (épistémologie) et définis par d'autres représentations.

1.2 Critique et évolution des théories classiques

1.2.1 Problème de l'a-modalité

Le pouvoir explicatif de cette vision de la cognition a contribué à son succès depuis les années 50. Ces symboles ont largement été adoptés par la communauté scientifique par leur puissance explicative et l'élégance avec laquelle ils permettent de représenter le monde extérieur. De plus, ces symboles étaient en adéquation avec la montée des sciences informatiques dans les années 50. Ils étaient également un moyen simple d'appréhender des phénomènes complexes comme la catégorisation, la mémoire, l'inférence, la compréhension ou encore le langage (e.g. Anderson, 1983; Chomsky, 1959; Newel, 1990; Newel & Simon, 1972). Cependant, des critiques de ces théories ont commencé à émerger dans les années 80 (e.g. Searle, 1980; Lakoff, 1987; Harnad, 1990; Glenberg, 1997; Barsalou, 1999).

La critique principale faite au cognitivisme concerne son caractère abstrait, amodal et détaché de la réalité concrète (Barsalou, 2008). Les cognitivistes n'ont fourni aucune preuve expérimentale de l'existence des symboles amodaux dans la cognition. La transformation d'information sensorielle sous forme abstraite n'est pas retrouvée dans la littérature

expérimentale. Il n'existe, à ce jour, aucune preuve expérimentale d'une transformation d'information modale en information amodale dans le cerveau. De plus, aucune preuve expérimentale ne vient supporter l'existence d'une quelconque structure cérébrale sous-tendant l'encodage et le stockage d'information amodale (Barsalou, 2008). De la même manière, les théories cognitives classiques n'arrivent pas à expliquer comment ces représentations amodales seraient congruentes avec les principes de computation neuronaux. En d'autres termes, le phénomène de transduction décrit comme principe fondateur de la création de connaissance n'a pas lieu d'être dans l'architecture cérébrale connue jusqu'ici.

Un deuxième aspect que soulève cette conception amodale est connue sous le nom de "*grounding problem*" (Harnad, 1990). Cette critique se réfère à la circularité dans la caractérisation des symboles et des concepts utilisés par le système cognitif. Ainsi, le fonctionnement psychologique serait basé sur des symboles qui sont eux-mêmes définis par d'autres symboles. Il est dès lors impossible de savoir sur quelle base ("*ground*") réelle sont définis ces symboles. Par exemple, de nouvelles connaissances ne peuvent être le reflet de la réalité si elles sont uniquement basées sur des symboles abstraits et arbitraires. Apprendre qu'un zèbre est un cheval avec des lignes ne permettrait pas à un individu de se faire une idée à priori que ce qu'est un zèbre sans l'avoir vu. Puisque l'image du cheval n'est en aucun cas présente dans la représentation du cheval, "rajouter des lignes" à un concept abstrait ne donne pas lieu à une perception (Ross, 2009).

1.2.2 Evolution connexionniste

Conscient de la lacune sur le plan psychophysiologique, les connexionnistes ont tenté de rapprocher les théories cognitives au substrat cérébral. Leur vision, restant proche de la cognition classique, tient compte des limites fonctionnelles et structurelles du cerveau humain. Le courant connexionniste fit son apparition dans les années 40 mais se développa surtout dans les années 80 en même temps que l'évolution des connaissances et techniques informatiques. Les connexionnistes ont étudié l'esprit en utilisant des réseaux de neurones censés imiter le fonctionnement des neurones humains. Ces réseaux de neurones sont généralement composés d'une multitude d'unités de traitement simples qui sont reliés entre eux. Dans le cerveau biologique, ces unités de traitement sont les neurones (individuellement) et sont connectés par des axones et des synapses. Le fonctionnement de ces unités est semblable à celui des neurones biologiques. Chaque unité de traitement reçoit des signaux d'un groupe d'unités qui lui est connecté et transmet l'information à un autre groupe de neurones (Clark, 2001).

Le courant connexionniste se sépare cependant du cognitivisme à plusieurs égards. Premièrement, ces unités de traitement fonctionnent en parallèle: les unités fonctionnent toutes simultanément et indépendamment les unes des autres. Là où le cognitivisme décrivait des opérations de traitement de l'information sérielles, le connexionnisme permet l'étude d'opérations réalisées simultanément.

Deuxièmement, ces réseaux de neurones sont distribués. Le système symbolique des théories cognitives classiques attribue à chaque concept un seul symbole (mot) qui englobe tout ce que ce concept représente. Dans le connexionnisme, comme Hebb (1949) l'avait suggéré dans l'étude des neurones biologiques, l'information traitée par ces neurones réside dans leur interconnectivité. Les représentations qui sont manipulées par ces réseaux de neurones artificiels sont représentées par des patterns d'activation (Clark, 2001). Les réseaux connexionnistes reposent sur des représentations distribuées "sub-symboliques", c'est-à-dire que les symboles sont décrits par un ensemble d'autres représentations. Ces représentations d'ordre inférieur sont mises en commun pour former un concept. Cette distribution de l'information permet de la manipuler plus facilement et de tenir compte des ressemblances entre certains événements. Ainsi, la reconnaissance d'un objet dans une scène sera systématiquement identique même si l'orientation de cet objet change. On peut dès lors imaginer qu'un réseau de neurones ayant pour but de détecter un chat sur une image va également s'activer de manière partielle si une panthère s'y trouve car celle-ci partage plusieurs caractéristiques communes avec le chat. Par contre, la présence d'une poule sur l'image ne donnera lieu à aucune activation.

Troisièmement, le connexionnisme permet d'expliquer les phénomènes d'adaptation, ce dont le cognitivisme était incapable. Les théories cognitivistes reposent sur des transformations de l'information basées sur une grammaire fixe et un ensemble de règles proches de la logique formelle. Ainsi, si les étapes nécessaires à la résolution d'un problème ne sont pas présentes dans le système cognitif, ce problème ne trouvera pas de solution avant qu'une nouvelle règle permettant de le résoudre ne soit apprise (i.e. provenant de l'extérieur). Les réseaux de neurones connexionnistes quant à eux, s'adaptent et apprennent à résoudre le problème par eux-mêmes. Par essais et erreurs, le système réorganise son réseau et modifie le poids synaptique entre chaque unité de traitement jusqu'à arriver à la solution. Concrètement, le système est exposé à une multitude d'inputs et produit des outputs initialement faux. Le réseau va ensuite comparer ces outputs à la solution attendue et va corriger le poids synaptique de certaines unités afin de produire un output correct à chaque présentation d'un input. Ainsi, le réseau connexionniste s'adapte aux erreurs qu'il produit initialement.

Il est important de noter que cette évolution connexionniste ne résout pas le problème de l'a-modalité des théories cognitivistes. Elle rajoute de la profondeur et de la rationalité aux théories computationnelles (i.e. basées sur un fonctionnement proche de celui d'un ordinateur) mais maintient une séparation effective entre le corps et l'esprit. Ces théories connexionnistes vont se montrer importantes dans le développement de l'intelligence artificielle, dans la compréhension des mécanismes perceptifs et de la modélisation de la cognition.

1.3 La cognition incarnée

Plusieurs courants de recherche regroupés sous le terme de "*Grounded Cognition*" (voir Barsalou, 2008, 2010) ont remis en question les théories cognitivistes traditionnelles qui utilisent ces symboles amodaux. Ces différentes théories suggèrent que la cognition est avant tout modale et basée sur des expériences physiques et corporelles. Historiquement, les

premiers arguments dans ce sens sont apparus avec les travaux sur l'imagerie mentale, principe massivement rejeté par les cognitivistes (e.g. Pylyshyn, 1973). Les théories cognitivistes impliquant l'absence de représentations modales, il était impensable que la cognition soit capable de produire des "images" mentales. Cependant, des chercheurs tels que Paivio (1971), Shepard et Cooper (1986) ou encore Kosslyn (1980) ont mis en place des paradigmes expérimentaux démontrant l'implication de ces images mentales dans des processus cognitifs de haut niveau. Shepard et Metzler (1971) ont par exemple démontré l'existence du phénomène de rotation mentale dans la résolution d'un problème. La tâche des participants était de déterminer si deux objets vu sous des angles différents étaient effectivement identiques ou non. Leurs résultats ont montré que le temps de réponse des participants était corrélé à la différence d'orientation entre les deux objets, suggérant ainsi la simulation mentale d'une rotation de l'objet afin de déterminer s'ils étaient identiques.

Des années plus tard, Lakoff et Johnson (1980, 1999) se sont fixé comme objectif de comprendre pourquoi le langage utilisait tant de métaphores. Par exemple, il n'est pas rare de décrire quelqu'un comme étant *chaleureux* ou de *dévorer* quelqu'un des yeux. De la même manière, la verticalité est souvent associée à une expérience affective positive ou négative. En fonction de son état affectif, le moral d'un individu est décrit comme étant *au plus bas* ou *au plus haut*. Des personnes tristes auront tendance à rester immobiles, se coucher ou s'asseoir alors que des personnes heureuses vont littéralement sauter dans les airs. Lakoff et Johnson (1980, 1999) et Gallese et Lakoff (2005) ont dès lors suggéré que les concepts manipulés dans la cognition, particulièrement dans le langage, seraient issus métaphoriquement d'expériences physiques et corporelles. Les symboles ne seraient donc plus décrits par d'autres symboles mais plutôt basés ("*grounded*") sur des réalités physiques et perceptives.

Parmi ces courants de recherche sur la *Grounded Cognition*, la "cognition incarnée" suggère que pour fonctionner, les processus cognitifs de haut niveau utilisent une réactivation (i.e. simulation) partielle d'états sensoriels, moteurs et affectifs (Wilson, 2002 ; Glenberg, 2010). En d'autres termes, l'idée principale défendue par le courant de la cognition incarnée est que la simulation mentale d'états corporels sous-tend la cognition (Glenberg, 2010; Shapiro, 2010). Cette approche incarnée de la cognition est supportée dans un nombre de domaines dans lesquels elle trouve une application.

Une première approche de la cognition incarnée est proposée par Barsalou (1999) dans sa théorie des systèmes de symboles perceptifs. Près de cinquante ans après les travaux de Hebb (1949), Barsalou (1999) (voir aussi Rubin, 2006) suggèrent que l'encodage d'un événement comporte une variété de composants issus des différentes modalités (e.g. vision, audition, action, spatialité, émotions et langage). De plus, son accès en mémoire résulte en la simulation mentale de tous ces composants en même temps, reflétant ainsi la richesse d'un événement multi-sensoriel. Ils suggèrent dès lors que l'accès à une information en mémoire reviendrait à réactiver partiellement les réseaux neuronaux utilisés lors de son acquisition.

Ces travaux ont donné lieu à un grand nombre de recherches sur la simulation mentale et plus particulièrement sur le caractère modal de ces représentations en mémoire. Parmi les

plus marquants, Pecher, Zeelenberg et Barsalou (2003, 2004) ont noté qu'il y avait un coût cognitif à changer de modalité lors d'une tâche. Dans une tâche de priming perceptif, les temps de réaction étaient plus rapides lorsque la première (prime) et la deuxième stimulation étaient dans la même modalité (e.g. Spence, Nicholls & Driver, 2000). De la même manière, il est plus facile de vérifier qu'une voiture peut être bruyante après avoir déterminé un attribut auditif d'un objet (Pecher et al., 2003). Brunel, Labeye, Lesourd et Versace (2009) ont quant à eux suggéré que cette réactivation (simulation) peut également s'effectuer de manière spécifique à une modalité. En association un bruit blanc de 500ms à une image, ils ont observé un ralentissement dans un traitement auditif non relié réalisé moins de 500ms après la présentation de l'image. En effet, lorsque l'image était présentée, le système auditif du participant était "occupé" à simuler le bruit qui lui était associé, empêchant tout autre traitement auditif. Lorsque le temps entre l'apparition de l'image et du traitement auditif à effectuer était supérieur à 500ms, l'interférence disparaissait. Cette spécificité se retrouve également au niveau de l'effecteur utilisé dans une action. Ainsi, Yang, Gallo et Beilock (2009) ont par exemple démontré que les représentations des lettres sur un clavier étaient associées à la main avec laquelle elles étaient tapées.

A la suite des travaux de Lakoff et Johnson (1980, 1999), Glenberg et Kaschak (2002) ont proposé une deuxième approche à la cognition incarnée à travers le langage. Ils suggèrent que la compréhension (sémantique) du langage est basée sur des simulations mentales. La compréhension d'une phrase, lue ou entendue, se baserait sur une simulation de son contenu au niveau mental (Barsalou, 1999). Glenberg et Kaschak (2002) se sont par exemple intéressés à la notion de transfert. Ils ont montré que des phrases impliquant un transfert entre deux individus (aussi bien physique qu'abstrait, e.g. transfert de responsabilité ou raconter une histoire) donnaient lieu à des réponses plus rapides lorsque celles-ci se faisaient en poussant un levier (simulant un transfert) qu'en le tirant vers soi. L'effet inverse a été observé lorsque les phrases décrivaient une réception (e.g. recevoir un cadeau, entendre une histoire). Kaschak et al. (2005) ont quant à eux observé des réponses plus rapides lorsque le mouvement impliqué dans une phrase entendue était congruent avec le déplacement observé d'un stimulus, suggérant une simulation interne du mouvement (voir Zwaan et Taylor, 2006 pour une revue). Ces résultats sont en accord avec les données d'imagerie cérébrale récoltées sur ce sujet. Hauk et al. (2004) ont par exemple montré une plus grande activité corticale dans la zone contrôlant la main à l'écoute du mot "attraper" et également dans la zone contrôlant le pied pour le mot "taper" (avec le pied, *kick* en anglais) (voir aussi Pulvermüller, 2005). Finalement, Glenberg et al. (2008) ont observé des potentiels évoqués moteurs (MEP) plus importants au niveau des muscles du bras dans la compréhension de phrases impliquant un transfert abstrait. Le cerveau simulerait un transfert physique dans la compréhension d'un transfert abstrait.

Cette vision incarnée de la cognition a également trouvé écho dans la recherche en psychologie sociale et sur les émotions (Meier, Schnall, Schwarz et Bargh, 2012). Bargh, Chen et Burrows (1996) ont par exemple observé qu'activer le stéréotype "personne âgée" chez des participants a donné lieu à des mouvements de locomotion plus lents que ceux chez qui le stéréotype n'avait pas été activé. Dijksterhuis & Bargh (2001) et Dijksterhuis, Aarts, Bargh et van Knippenberg (2000) montrent également des effets négatifs de ce stéréotype sur

le temps de décision lexicale et sur la mémoire, respectivement. Ces exemples montrent bien en quoi l'accès à un stéréotype donne lieu à l'expression de certaines de ces caractéristiques (la lenteur et les déficits de mémoire dans ce cas-ci). A l'inverse, d'autres auteurs ont observé que des actions dont la signification tient parfois de la métaphore (e.g. Barsalou 1999) pouvaient interférer avec des tâches de jugement. Cacioppo, Priester et Bernston (1993) ont par exemple démontré que l'association d'un mouvement d'approche ou de répulsion à l'égard d'idéogrammes sans signification biaisait leur jugement par la suite. Les idéogrammes associés au mouvement d'approche étaient vu plus positivement que les idéogrammes associés au mouvement de répulsion. Des résultats similaires ont été observés avec des mouvements de la tête (Wells, & Petty, 1980) et grâce à l'activation spécifique des muscles faciaux utilisés pour exprimer une émotion (Strack, Martin, & Stepper, 1988). Dans une démonstration des plus convaincante, Williams & Bargh (2008) ont également montré que le caractère "chaleureux" de quelqu'un était directement lié à la sensation physique de chaleur. Les auteurs ont demandé aux participants de tenir dans leurs mains un café chaud ou glacé. Ils ont ensuite demandé aux participants de juger des candidats sur plusieurs dimensions notamment liées à leur caractère "chaleureux", sur base de leur CV. Conformément aux prédictions de la cognition incarnée, le caractère chaleureux des candidats étaient mis en avant par rapport aux autres dimensions sociales lorsque les participants ont tenu en main un café chaud. Ils ont ensuite montré que ces mêmes candidats étaient plus enclins à partager un cadeau avec un ami.

Dans le domaine des émotions, Niedenthal, Brauer, Halberstadt et Innes-Ker (2001) ont suggéré que les émotions étaient "incarnées" de la même façon que d'autres types d'information en mémoire. Leur idée était que le traitement des émotions reposait également sur une simulation mentale de ces émotions. Etant donné la nature abstraite des concepts liés aux émotions, ces auteurs ont suggéré que ces simulations étaient d'ordre motrice. Ainsi, ils ont demandé à des participants de juger à quel moment l'expression faciale exprimée par un individu changeait (e.g. le passage d'une expression neutre à l'expression de la joie). Niedenthal et al. (2001) ont dès lors observé que les participants à qui il était interdit d'imiter les visages montrés à l'écran ont été plus lents à détecter un changement d'expression faciale que les autres participants libres d'imiter. Ce résultat suggère donc que l'imitation faciale de l'expression d'autrui serait essentielle dans son traitement. Dans le même ordre d'idée, Oberman, Winkielman et Ramachandran (2007) ont suggéré que le blocage de l'expression d'une certaine émotion perturbait sa reconnaissance (voir également Strack, Martin, Stepper, 1988). En effet, les participants devaient tenir un crayon par le bout des lèvres, empêchant ainsi l'activation des muscles utilisés dans l'expression du sourire. Ils ont montré que cette manipulation donnait lieu à une détérioration de la reconnaissance de l'expression de joie mais pas de peur ou de colère. A l'inverse, Niedenthal, Winkielman, Mondillon et Vermeulen (2009) ont démontré que l'accès à un concept émotionnel donnait lieu spécifiquement à l'expression inconsciente de cette émotion sur le visage des participants (voir également Warren et al., 2006). Niedenthal et al. (2009) ont observé une activité motrice spécifique des muscles servant à exprimer une émotion lors d'un traitement émotionnel d'un mot. Lorsque ce même mot devait être traité de manière purement perceptive, aucune activité motrice

couverte n'a été observée. Ces résultats suggèrent donc que c'est l'accès au concept émotionnel qui donne lieu à une activité motrice couverte et non sa simple perception.

Le concept d'empathie semble également être basé sur ce principe de simulation mentale. Singer, Seymour et O'Dogerty (2004) ont par exemple montré des patterns d'activation cérébrale similaires lorsqu'une participante recevait un stimulus douloureux sur sa main et lorsque celui-ci était appliqué sur la main de son partenaire. Gallese, Keyser et Rizzolatti (2004, pp 401) affirment à ce sujet: " La cognition sociale n'est pas seulement penser aux contenus à l'intérieur de l'esprit de quelqu'un... Notre cerveau, et ceux d'autres primates, ont apparemment développé un mécanisme fonctionnel basique, un mécanisme miroir, qui nous permet d'avoir un aperçu de ce qui se trouve dans leur tête. Ce mécanisme pourrait constituer la première vue unificatrice à propos des bases neuronales de la cognition sociale ".

1.4 La découverte des neurones miroirs

Le mécanisme miroir que Gallese et al. (2004) mentionnent fait référence aux circuits neuronaux appelés "système de neurone miroir" (SNM) dont la découverte a contribué à l'avancée des théories sur l'incarnation de la cognition. Ces neurones visuo-moteurs ont d'abord été découverts dans la zone cérébrale F5 du macaque. Ces neurones miroirs avaient la particularité de s'activer lorsque le singe réalisait une action et également lors de son observation (Gallese, Fadiga, Fogassi, & Rizzolatti, 1996; Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996).

L'étude du SNM chez le singe a permis de mettre en évidence plusieurs propriétés des neurones miroirs. La première est qu'ils ne déchargent que lorsque les actions sont réalisées avec un but précis (i.e. *goal-directed*) (Rizzolatti, Camarda, Fogassi, Gentilucci, Luppino, Matelli, 1988). Deuxièmement, ces neurones étaient actifs même lorsque l'action observée est incomplète (Umiltà et al., 2001) et permettait à un singe d'imiter l'action dans son entièreté. Cette observation suggère dès lors que les neurones miroirs réagissent davantage au but de l'action qu'aux mouvements réalisés pour y parvenir; des gestes similaires à une action précise réalisés hors contexte ne donnent pas d'activation. Lorsque ces mouvements sont réalisés avec des effecteurs différents, les neurones miroirs s'activent également (e.g. attraper un objet avec le pied ou la main) (Fogassi et al. 2005; Umiltà et al. 2008; et Rizzolatti et Craighero, 2004 pour une revue). De manière intéressante, au-delà de l'observation d'actions, une certaine proportion des neurones miroirs est également activée par le son produit par ces actions (i.e. appelés *écho-neurones*). En effet, Kohler et al. (2002) ont démontré que la présentation d'un son relatif à une action activait 15% des neurones miroirs activés lors d'une présentation visuelle. A l'image de l'expérience d'Umiltà et al. (2001), entendre un son relatif à une action permettait au singe de comprendre de quelle action il s'agissait afin de l'imiter. Ces recherches suggèrent donc que les neurones miroirs codent des actions orientées, ayant un but particulier. Ils servent également à comprendre une action (Rizzolatti, Fogassi, & Gallese, 2001) en faisant correspondre sa perception à sa représentation motrice chez l'observateur, permettant ainsi l'imitation.

Les preuves d'un tel système chez l'homme sont indirectes: il n'existe aucun enregistrement uni-cellulaire attestant de leur existence. Cependant, l'imagerie fonctionnelle a permis de mettre en évidence une activité homologue chez l'homme dans l'aire 44 de Brodmann et l'adjacente aire 6 (i.e. prémotrice ventrale ou vPMC) (Rizzolatti et Craighero, 2004). Cette zone du cerveau humain s'active autant lors de l'observation d'une action que pendant sa réalisation. Chez l'homme, cette zone sous-tendrait plusieurs mécanismes: compréhension d'action, imitation, compréhension d'intention et empathie (Rizzolatti & Craighero, 2004 ; Rizzolatti, 2005). Des études neuropsychologiques de patients cérébro-lésés ont également mis en évidence l'existence d'un SNM chez l'homme. Pazzaglia, Smania, Corato et Aglioti (2008) ont par exemple montré que des patients souffrant de lésions produisant une apraxie bucco-faciale dues à des lésions au niveau du vPMC (Aire 6) avaient des difficultés à reconnaître la signification de sons produits avec la bouche mais pas avec les mains. De la même manière, des patients souffrant d'apraxie limitée aux membres avaient des difficultés pour les sons produits avec les mains et non avec la bouche. Fazio et al. (2009) observent également chez des patients aphasiques de Broca une difficultés à ordonner des images prises d'un court film illustrant une action humaine. Ces mêmes patients n'avaient cependant aucune difficulté avec des images illustrant la chute d'un vélo.

L'idée selon laquelle une composante motrice est nécessaire à la compréhension d'actions peut paraître étrange. Sa perception visuelle pourrait dès lors suffire à identifier l'action et la comprendre. Cependant, le système visuel ne pourrait accéder qu'aux informations de surface, créant une description de ce qui est visible. Dans le cas d'un agent A qui donne un objet à un agent B, le système visuel décrirait simplement la translation de l'objet de A vers B ainsi que le déplacement des bras de l'agent A. Afin de réellement comprendre l'interaction entre A et B, l'observateur doit s'interroger sur la signification de ces mouvements. Pour ce faire, il est dès lors nécessaire d'accéder à ses propres représentations motrices: se mettre à la place de l'agent A (Rizzolatti & Craighero, 2004).

De la même manière que chez le singe, le système miroir chez l'homme réagit également à l'observation d'une action incomplète et permet d'en inférer l'intégralité. Johnson-Frey et al. (2003) ont par exemple montré qu'observer la situation finale d'une action (i.e. objet attrapé) active également le système miroir. Ils montrent également une plus grande activité comparée à une situation où l'objet est simplement touché. Ceci suggère que le système miroir encode la relation spécifique entre un effecteur et un objet comme étant le but à atteindre (i.e. *goal-directed*). Dans l'exemple cité plus haut, observer l'agent A portant l'objet, les bras tendus vers l'agent B donnerait la même compréhension (i.e. A donne l'objet à B) que l'observation de la scène entière.

Cette composante motrice peut également être accédée dans la compréhension d'actions présentées sous forme auditive. Tettamant et al. (2005) ont en effet observé une activation identique du SNM à la vue d'une action et à sa description verbale. Comme chez le singe (Kohler et al. 2002), le SNM semble également réagir à des stimuli auditifs (non verbaux) reliés aux actions (voir Aglioti et Pazzaglia, 2010 pour une revue). Par exemple, Pizzamiglio et al. (2005) ainsi que Alaerts, Swinnen et Wenderoth (2009) ont montré que

l'écoute de sons produits par des actions humaines donnait lieu à l'activation du système miroir. Ecouter des sons relatifs à des actions typiquement réalisées à l'aide de la main ou de la bouche donnait lieu à une activation motrice ou prémotrice correspondante somatotopiquement (Gazzola, Aziz-Zadeh, & Keysers, 2006; Galati et al., 2008; Aziz-Zadeh et al. 2004).

L'idée selon laquelle le SNM fournit une copie motrice de l'action observée (ou entendue) est particulièrement relevant pour comprendre les phénomènes d'imitation. Les capacités d'imitation chez l'homme sont largement supérieures à celles observées chez le singe (Iacoboni et al., 1999) et sont également sous-tendues par des mécanismes miroirs. A la différence des singes, les hommes sont capables d'imiter en détail une action. Les singes, quant à eux vont se contenter d'émuler l'action, c'est-à-dire à simplement reproduire le but final de l'action (Rizzolatti et Craighero, 2004). Par exemple, lorsqu'un être humain va réaliser des zig-zags avec sa main avant d'attraper un objet, le singe va simplement prendre l'objet. Grâce au SNM, l'homme a accès à la décomposition détaillée du mouvement, lui permettant d'imiter l'action de manière exacte.

La compréhension de l'intention liée à une action semble également être codée et accessible grâce au SNM (Gallese et Goldman, 1998). Iacoboni (2005) a par exemple proposé que l'observation d'actions de préhension dans différents contextes a permis aux participants d'inférer l'intention derrière la préhension. C'est d'ailleurs cette seule condition qui a donné lieu à une activation du SNM alors que lorsque ces actions de préhension étaient réalisées sans contexte ou que les objets étaient présentés seuls (sans préhension), aucune activation n'a été observée.

Comme l'étude de Niedenthal et al. (2001) l'a suggéré, le SNM interviendrait également dans la compréhension d'émotions et dans l'empathie (e.g. Singer et al. 2004). Des études d'imagerie fonctionnelle ont en effet démontré que l'observation d'émotion (i.e. leur expression) et l'expression effective de ces émotions activaient toutes les deux le SNM. Wicker et al. (2003) ont par exemple présenté des odeurs déplaisantes et des films montrant un individu exprimant du dégoût à des participants. L'observation de l'expression faciale du dégoût et la réaction aux odeurs déplaisantes (i.e. dégoût) activaient toutes les deux la même zone dans l'insula antérieure. Singer et al. (2004) montraient quant à eux que l'observation de l'expression de la douleur chez une personne proche donnait lieu à la même activation qu'une douleur réelle chez un observateur. Ces résultats suggèrent donc que ces participants ont ressenti les émotions observées à travers l'activation des composantes motrices caractérisant ces émotions (e.g. Niedenthal et al. 2009). Cette capacité à ressentir l'émotion d'autrui est directement liée à l'activité du système miroir (Gazzola et al., 2006). Cette imitation, quasi automatique, serait également à la base de la compréhension des émotions d'autrui, notamment les expressions faciales (Dimberg, Thunberg, & Elmehed, 2000) ou les postures (Hatfield, Cacioppo, & Rapson, 1994).

Un certain nombre d'études sur les neurones miroirs ont également mis en évidence le concept de "répertoire moteur". Ce concept suggère que le SNM ne réagirait qu'aux actions

observées qui font partie du répertoire de l'observateur ou qui lui sont possibles de réaliser. Buccino et al. (2005) ont par exemple démontré que l'observation d'une action de morsure par un homme, un singe ou un chien donne lieu à la même activité du système miroir (chez l'homme). Cependant, les actions communicatives spécifiques à chaque espèce ne donnaient pas lieu à la même activité. Les gestes expressifs du singe ont donné lieu à une légère activation chez l'homme mais l'abolement du chien n'a donné lieu à aucune activité du SNM. Ces auteurs suggèrent donc que pour activer le système miroir, une action doit être connue ou possible à faire par l'homme. Cross, Hamilton et Grafton (2006) ont également montré que voir un mouvement issu de son répertoire, même appris récemment, active plus les zones prémotrices et pariétales. De la même manière, des sons reliés à l'utilisation d'un outil active les mêmes aires que durant l'observation de ces outils et l'observation d'un mime de l'utilisation de ces outils (Lewis, Brefczynski, Phinney, Janik, & DeYoe, 2005) mais uniquement si ces outils peuvent être utilisés par le participant (e.g. téléphone vs. piano) (e.g. De Lucia, Camen, Clarke, & Murray, 2009). De Lucia et al. (2009) observent en effet chez des non musiciens que les sons des touches d'un téléphone donnent lieu à une activité cérébrale du SNM mais pas les sons produits par les touches d'un piano (i.e. notes).

1.5 Le cycle perception-action

Comme nous l'avons vu jusqu'ici, les représentations motrices et perceptives semblent être étroitement liées. L'idée selon laquelle la perception et l'action seraient liées ne date pas d'hier, cependant. Williams James (1890) a en effet suggéré avec son principe idéomoteur que *"every representation of a movement awakens in some degree the actual movement which is its object"*. Historiquement, peu d'attention a été donnée à cet aspect de la cognition avant la remise en question des théories cognitivistes. Le corps n'était alors vu que comme servant à la perception d'un stimulus et à la production d'une réponse motrice adaptée.

Parmi les premiers travaux qui ont postulés un lien étroit entre perception et action, on retrouve des études sur la compréhension du langage. McGurk et MacDonald (1976) ont suggéré que les représentations motrices associées à la production du langage pouvaient interagir avec la perception auditive du langage. Ainsi, ils ont présenté à des participants des syllabes sous plusieurs formats différents. Premièrement, les participants voyaient un homme prononcer une syllabe sans avoir de retour auditif (image uniquement). Deuxièmement, ils entendaient une syllabe prononcée. Finalement, les auteurs ont présenté aux participants une combinaison des deux, son et image. Bien entendu, l'intérêt résidait dans la combinaison des deux modalités et plus particulièrement lorsque celles-ci étaient incongruentes. McGurk et MacDonald (1976) ont dès lors montré que lorsque les participants voyaient les mouvements faciaux utilisés pour prononcer /ba/ en entendant la syllabe /ga/, ceux-ci reportaient entendre la syllabe /da/. Cet effet (l'effet *McGurk*) suggère donc que la perception auditive pouvait être modifiée à l'aide d'informations perceptives (motrices) incongruentes. Cette interaction entre la perception et la production du langage a été examinée de plus près par Liberman et Mattingly (1985) quelques années plus tard dans leur Théorie Motrice de la Perception du Langage. Selon eux, entendre du langage donnerait lieu automatiquement à l'activation des commandes motrices nécessaires pour produire les sons entendus et inversement. Ainsi, il

n'est pas rare de s'aider de l'information visuelle (mouvement des lèvres) afin de mieux comprendre quelqu'un lorsqu'il y a beaucoup d'interférences auditives (bruit environnant). La lecture labiale permet d'extraire une information auditive à partir d'une information motrice. Cet effet se retrouve également au niveau cérébral où l'écoute de mots et de non-mots est liée à une plus grande excitabilité corticale au niveau des muscles de la langue (Fadiga et al., 2002). De manière intéressante, ils ont montré des MEP plus importants lors de l'écoute de sons qui demandent une activité de la langue comme ' rr ' que lors de l'écoute de sons comme ' ff '. D'Ausilio et al., (2009) montrent également une augmentation des MEP au niveau des lèvres et de la langue à l'écoute de phonèmes articulés (voir également Watkins et al. 2003).

En même temps que les travaux sur les neurones miroirs, des chercheurs français se sont intéressés à la simulation mentale d'actions (e.g. Jeannerod, 1994). Selon eux une action simulée peut activer dans le cerveau une perception qui ressemble à celle qui aurait eu lieu lors de la réalisation effective de l'action (Decety, 2002; Grèzes, Decety, 2001). Jeannerod (1999) suggère également qu'une action implique l'activation de sa représentation pragmatique, incluant son but, les moyens à mettre en œuvre pour l'atteindre et également ses conséquences. Berthoz, (1997) suggère quant à lui que la perception est une action simulée ayant comme substrat des neurones qui sont reliés à des réalités physiques du monde extérieur. Cette réactivation neuronale s'opère de façon indiscriminée, que l'action soit observée, réalisée ou imaginée. A propos de cette automaticité, Decety et Grèzes (2006) suggèrent que ce phénomène de simulation mentale intervient majoritairement de manière inconsciente dans des situations d'observation mais qu'elle sous-tend également l'imagerie motrice sous la forme d'une réactivation consciente et volontaire d'une action (e.g. Ruby et Decety, 2004). Ruby et Decety (2004) suggèrent qu'imaginer un mouvement de manière volontaire réactive les circuits moteurs de façon similaire à l'observation ou la réalisation de cette action (voir également Grafton, Arbib, Fadiga et Rizzolatti, 1996; Schubotz et von Cramon, 2004). Il existerait donc un recouvrement partiel des zones impliquées dans l'imagination d'une action réalisée par soi-même et quelqu'un d'autre (Ruby, & Decety 2001).

Cette idée que la perception d'un mouvement va évoquer chez l'observateur ce même mouvement est à la base de la théorie du codage commun (*Common Coding*) proposé par Prinz (1997). Ce codage commun fait référence au partage des représentations mentales utilisées dans la perception et la réalisation d'actions. Ainsi, lorsqu'un des composants (moteur ou perceptif) est activé, les zones cérébrales motrices et perceptives sont toutes les deux activées. La combinaison de représentations motrices et perceptives donne lieu à la création de modèles internes relatifs à la relation qu'entretiennent ces deux représentations. Ces modèles peuvent décrire l'influence entre les deux composants de deux manières (Wolpert, Ghahramani, & Jordan, 1995). Les modèles inverses, également appelés "résonance motrice", correspondent à la façon dont la perception active les commandes motrices nécessaires à l'atteinte d'un tel état perceptif (e.g. Jeannerod, 1994; Prinz, 1997; Rizzolatti et al., 2001). A l'inverse, les modèles "directs" (forward en anglais), aussi appelés "résonance perceptive", correspondent à la façon dont l'action active des états perceptifs (Hommel, et al. 2001). En d'autres termes, le système prédit les conséquences sensorielles de l'action réalisée ou

planifiée (voir Davidson et Wolpert, 2005 pour une revue). La relation qu'entretiennent perception et action est donc cyclique, leur influence étant réciproque.

En général, l'interaction entre perception et action peut se retrouver dans deux situations différentes: dans une situation *offline* où la perception ou l'action est isolée mais reste influencée par l'autre composante qui n'est pas présente (i.e. mentalement) et dans une situation *online* impliquant à la fois une composante motrice et perceptive (e.g. double tâche; Pashler, 1974). Müsseler (1999) met l'accent sur l'importance du contenu des deux tâches impliquées. En effet, une tâche demandant un traitement perceptif spatial (gauche/droite) aura plus d'effet sur un mouvement dans l'espace que sur une tâche sémantique par exemple. L'influence qu'exercent la perception et l'action l'une sur l'autre peut prendre deux formes: contraste ou assimilation. L'effet de *contraste* correspond à une atténuation voire une répulsion entre les événements perçus et produits. À l'inverse, l'effet d'*assimilation* correspond à une attraction mutuelle entre les deux événements (Zwicker, Grosjean, & Prinz, 2010).

L'effet de contraste s'observe typiquement lorsque les tâches sont fonctionnellement non reliées, réalisées simultanément ou si elles n'impliquent pas de stimuli ambigus (Schütz-Bosbach, & Prinz, 2007). Schubotz et von Cramon (2004) suggèrent par exemple que la production d'un mouvement va impacter négativement la perception d'un mouvement. Ainsi, ils observent que l'estimation de l'amplitude des mouvements de stimuli visuels était corrélée négativement avec l'amplitude des mouvements produits par le participant pour répondre. Hamilton, Wolpert et Frith (2004) démontrent un effet similaire avec l'estimation du poids d'un objet pendant que le participant porte un objet léger ou lourd. Zwicker, Grosjean et Prinz (2008) suggèrent que cet effet proviendrait d'une inhibition partielle des représentations communes utilisées par la perception et l'action. Ainsi, si les tâches partagent des caractéristiques communes (e.g. amplitude, poids, direction), les valeurs de ces caractéristiques deviennent inhibées et moins accessibles. En d'autres termes, les participants seraient temporairement moins sensibles à des stimuli qui partagent ces caractéristiques et plus sensibles à d'autres caractéristiques. Par exemple, Miall et al. (2006) montrent que lorsque le participant dispose sa main dans une certaine position, il est plus rapide pour détecter un intrus parmi d'autres images représentant la position de sa main. De manière intéressante, Zwicker et al. (2010) détaillent l'argument en montrant que des mouvements passifs de la main ne donnent pas d'effet de contraste entre perception et action. Ils suggèrent dès lors que l'intention de bouger ainsi que la réalisation effective du mouvement sont nécessaires pour un effet de contraste (voir Jeannerod, 1994). En d'autres termes, un mouvement passif de la main ne donnerait pas lieu à l'activation d'une représentation mentale motrice capable d'interférer avec la perception.

L'autre effet, l'assimilation, s'observe généralement dans des contextes où des stimuli ambigus sont utilisés (*online* et *offline*). Par exemple, Wohlschläger (2000) a montré qu'il est possible d'influencer la perception de l'orientation ambiguë d'un objet. Il a demandé à des participants de réaliser un mouvement de la main dans une direction ou une autre. Il a ensuite observé une congruence entre la direction du mouvement et la perception de l'orientation de l'objet. Il a observé les mêmes résultats lorsque le participant s'apprêtait à faire ces

mouvements, renforçant l'idée de Jeannerod (1994) selon laquelle la préparation d'une action activerait également sa représentation mentale motrice. De plus, Fagiolo, Hommel et Schubotz (2007) ont démontré une influence spécifique des représentations mentales motrices activées sur une tâche perceptive. Ils ont en effet observé que la préparation d'une tâche de *grasping* améliorerait la détection d'objets trop grands (i.e. pour la préhension) alors que la préparation d'un mouvement de tâche de *reaching* améliorerait la détection d'objets placés aux mauvais endroits. Le but du mouvement (*grasping/reaching*) a dès lors amorcé la perception vers une tâche particulière. Ces résultats suggèrent donc que l'effet de l'action réalisée, planifiée ou amorcée sur la perception (résonance perceptive) peut donner lieu à un effet de contraste comme à un effet d'assimilation.

L'effet d'assimilation se retrouve également dans l'observation d'action (résonance motrice). A l'inverse de l'effet de contraste, cet effet suggère une plus grande sensibilité aux représentations des mouvements réalisés par soi-même. Knoblich et Flach, 2001 ont par exemple montré que la prédiction du succès d'une action est meilleure lorsque les participants observent leur propre action plutôt que l'action d'autrui. Loula, Prasard, Harber and Shiffrar (2005) montrent également qu'il est plus facile de se reconnaître comparativement à d'autres personnes dans diverses activités (voir également Auvray, Hoellinger, Hanneton, & Roby-Brami, 2011; Hohmann, Troje, Olmos, & Munzert, 2011). Cette idée correspond à la notion de "répertoire" évoquée dans l'étude des neurones miroirs. Ainsi, Decety et Grèzes (2006) ont observé une plus grande activité cérébrale lorsqu'un participant observe ses propres mouvements plutôt que ceux d'autrui. Ces résultats suggèrent une meilleure connaissance par les participants de leur propre corps et de leurs contraintes. En d'autres termes, il est plus facile de rentrer en résonance motrice avec ses propres mouvements car leur simulation mentale est une correspondance parfaite.

Un autre aspect de cette sensibilité à ses propres mouvements tient du fait que les contraintes motrices de son propre corps sont intégrées aux représentations motrices. Ces contraintes biomécaniques imposées aux corps sont également prises en considération lors de l'observation d'actions. Pozzo, Papaxanthis, Petit, Schweighofer et Stucchi (2006) ont par exemple étudié l'influence du caractère biologiquement correct (i.e. respectant les contraintes motrices) sur l'estimation de la trajectoire d'un mouvement. Ils ont démontré que l'estimation du point d'arrivée d'un mouvement est plus précise et moins variable lorsque les mouvements respectent les contraintes imposées au système moteur (i.e. mouvements biologiquement corrects). Lorsque ces mouvements possèdent un pattern de vitesse qui ne reflète pas les contraintes biologiques, leur estimation perd en précision. Un autre exemple est fourni par Grosjean, Shiffrar et Knoblich (2007) sur l'applicabilité de la loi de Fitt sur la perception. La loi de Fitt correspond au *trade-off* opéré entre la vitesse d'un mouvement et sa précision requise (e.g. en fonction de la taille de la cible). Ces auteurs ont montré une meilleure prédiction du succès d'un mouvement de préhension pour les mouvements respectant la loi de Fitt comparés à des mouvements violant cette loi. Shiffrar et Freyd (1990) montrent quant à eux que le timing entre la position de départ et la position de fin d'un mouvement va influencer la perception du mouvement comme étant physiquement possible. Dans leur expérience, les positions de départ et de fin sont de part et d'autre du genou d'un participant.

Ainsi, un intervalle trop court pour produire le mouvement était perçu comme donnant lieu à une situation impossible (i.e. traverser le genou). Un intervalle plus long donnait lieu à la perception d'un mouvement plus plausible (i.e. passer par dessus le genou). Stevens, Fonlupt, Shiffrar et Decety (2000) ont confirmé ces résultats en démontrant une activité cérébrale plus importante dans le cas des mouvements possibles comparativement à des mouvements impossibles. Ces résultats suggèrent donc que les contraintes biomécaniques qui régissent les mouvements humains sont intégrés dans la représentation partagée de la réalisation et de l'observation de ces mouvements. De plus, la résonance motrice serait d'autant plus facile à atteindre que les mouvements observés correspondent à des mouvements biologiquement corrects.

De la même manière, l'intégration des contraintes biomécaniques du mouvement se retrouve également dans des tâches d'imagerie motrice volontaire (opposée à la simulation automatique dans la résonance motrice). Conformément à la théorie du codage commun (Hommel et al. 2001; Prinz 1997; Hurley, 2008), Jeannerod, 2001 suggère que la capacité à simuler une action mentalement requiert l'activation des réseaux de neurones qui sont activés lors de l'exécution de cette action. La conséquence directe de cette superposition de ressources cérébrales serait un isomorphisme entre les mouvements réels et les mouvements imaginés, notamment au niveau de leur durée (e.g. Decety, Jeannerod, 1995). Decety, Jeannerod et Prablanc (1998) ont par exemple suggéré que des mouvements plus difficiles sont imaginés plus lentement que des mouvements plus faciles. Les mouvements réels effectués lors d'une tâche d'imagerie motrice semblent également avoir un impact sur celle-ci. Par exemple, Wexler, Kosslyn et Berthoz (1998) ont montré qu'un mouvement dans une direction incongruente à celle nécessaire en imagerie motrice va donner lieu à des temps de réaction plus longs. Des résultats similaires ont été obtenus lorsqu'il était demandé aux participants de ralentir leur mouvement réel dans une direction congruente.

En somme, la perception et l'action semblent s'influencer mutuellement sous la forme de deux mécanismes principaux: la résonance motrice et la résonance perceptive. La première suggère une influence de la perception sur l'action alors que la deuxième concerne l'influence de l'action sur la perception. Communes à ces deux mécanismes sont les deux formes que peuvent prendre cette interaction: positive ou négative. En effet, les représentations perceptives et motrices peuvent soit interférer l'une avec l'autre ou se renforcer mutuellement. De manière intéressante, la recherche a également montré que les contraintes biomécaniques imposées au système moteur étaient intégrées aux représentation motrices.

1.6 Théories écologiques de la perception

Une des principales critiques du cognitivisme était son manque de considération du contexte situationnel dans lequel l'individu se trouve. Plusieurs courants, dont ceux cités jusqu'ici vont dès lors mettre en avant l'interaction entre le corps et l'esprit. Si la cognition incarnée suggère que les représentations mentales intègrent des informations sensorielles et motrices, l'approche "écologique" s'oppose au cognitivisme de manière encore plus radicale en diminuant l'importance des représentations mentales.

Les premiers travaux proposant une approche "a-représentationnelle" à la cognition remontent aux années 70. Gibson (1979) proposa une théorie écologique de la perception visuelle où il suggère que la perception de l'environnement se ferait de manière fonctionnelle, c'est-à-dire qu'elle aurait un rôle majeur dans la compréhension du monde. Selon Borghi (2005), la perception serait un processus continu de découverte de réponses appropriées face à l'environnement. Ainsi, la perception serait un guide permettant des décisions rapides et efficaces face à des stimulations de l'environnement (Warren, 1984, 1988). En d'autres termes, les interactions possibles avec le monde seraient perçues directement, sans intervention de représentations mentales complexes. Une deuxième approche, notamment basée sur les travaux de Gibson, est proposée par Varela, Rosch et Thompson (1992). Selon eux, les représentations mentales "ne donnent aucune information quant à ce que cela signifie d'être un être humain au jour le jour dans des situations particulières". Dans ce sens, Noë (2004) suggère que la perception serait une activité, une compétence parmi d'autres. En d'autres termes, la perception est active et non passive. L'idée principale défendue dans cette approche écologique est que le corps doit être considéré comme faisant partie intégrante de l'environnement dans lequel il interagit. Ainsi, la cognition serait orientée vers ce que l'environnement offre comme potentiel d'interaction, ses *affordances* (Gibson, 1979).

Le concept d'affordance est central dans la vision écologique de la perception. Gibson (1979) suggère que la perception pour l'action aurait été sélectionnée par l'évolution. En effet, la capacité d'un animal à prendre des décisions rapides et efficaces face à l'environnement prédirait la survie de son espèce. Gibson suggère le nom "affordance" (de l'anglais "*to afford*" qui signifie "offrir" ou "fournir") pour désigner les relations qui existent entre les capacités d'un animal et les possibilités d'action offertes par l'environnement. Le terme a été utilisé pour la première fois en 1966 comme " ... ce que les choses fournissent, en bien ou en mal " (Gibson, 1966, p. 285). Ainsi, une affordance n'est pas intrinsèquement bonne ou mauvaise, elle s'offre à l'animal dans l'environnement et celui-ci choisi de la saisir ou non. Une affordance n'est donc pas une action en soi mais résulte de l'interaction entre les capacités d'action d'un individu et les possibilités d'action fournies par l'environnement. En d'autres termes, une affordance serait une compatibilité entre les deux (voir Hostetter, & Alibali, 2008; Witt, 2011 et Barsingerhorn, Zaal, Smith, & Pepping, 2012 pour une revue). Chez l'animal, par exemple, il sera utile pour lui de savoir à quel arbre il peut grimper pour semer un prédateur. Pour l'être humain, il peut simplement être question de savoir s'il est possible de franchir une marche d'escalier particulièrement haute (e.g. Warren, 1984).

Comparativement au lien entre perception et action mentionné plus haut, l'approche écologique de la perception met l'accent sur la valeur fonctionnelle d'un tel lien. Par exemple, Tucker et Ellis (1998, Ellis, & Tucker, 2000) ont démontré un effet de compatibilité entre le type de prise et l'observation d'un objet. Ainsi, déterminer si un objet était à l'endroit ou à l'envers était plus rapide lorsque la réponse était donnée avec la main permettant d'attraper l'objet (Tucker, & Ellis, 1998; voir également Symes, Ellis, & Tucker, 2007). De la même manière, le type de prise (pincé ou normal) donne lieu au même effet (e.g. Ellis, & Tucker, 2000) en fonction de la taille de l'objet. Selon eux, voir un objet amorcerait le type de prise qui doit être utilisé pour sa préhension. De manière intéressante, cet effet s'observe également

dans la lecture de mots correspondant à des objets (e.g. Tucker, & Ellis, 2004). Au delà de la rapidité à exécuter une tâche perceptive, cet effet de compatibilité oriente l'attention des participants dans une situation langagière. Chambers, Tanenhaus, Eberhard, Filip et Carlson (2002) ont en effet observé que leurs participants cherchaient du regard une solution adéquate à l'instruction de l'expérimentateur ("Mettez le cube dans la boîte") sans attendre la fin de l'instruction. Après avoir entendu "mettez le cube dans...", les participants ont balayé du regard les objets pouvant contenir le cube, suggérant une stratégie efficace basée sur la prédiction.

Comme suggéré par Gibson (1979), les affordances sont "personnelles" dans le sens où elles dépendent de l'individu qui perçoit. En effet, un individu de petite taille ne percevra pas de la même façon une porte qu'un basketteur de grande taille. Gibson (1979) a dès lors suggéré que pour mesurer les affordances, il est préférable de se défaire des unités standards (extrinsèques) et de considérer l'individu comme point de départ. Ainsi, Warren (1984) s'est intéressé à la capacité perçue à monter un escalier en fonction de la taille de la marche. Il a montré qu'indépendamment de la taille des individus, la hauteur maximale d'une marche franchissable correspondait à 88% de la taille de la jambe du participant. Plusieurs autres études similaires ont été réalisées sur d'autres tâches, notamment pour l'assise (s'asseoir) (e.g. Mark, 1987; Mark, Balliett, Craver, Douglas, & Fox, 1990), passer dans des ouvertures (e.g. Warren & Whang, 1987), passer sous des barrières (e.g. Wagman, & Malek, 2009), franchir un obstacle (Pufall, & Dunbar, 1992) ou un fossé (Jiang, Mark, 1994) ou encore monter une pente (Kinsella-Shaw, Shaw, & Turvey, 1992). Cette vision de l'affordance a été qualifiée de *body-scaled* car elle se basait sur des paramètres purement anthropométriques (Barsingerhorn et al. 2012). Par la suite, une vision *action-scaled* focalisée sur les capacités d'action a été adoptée afin d'étudier l'impact d'autres facteurs non anthropométriques sur les affordances (e.g. souplesse, force musculaire, IMC, etc.). En effet, les capacités d'actions peuvent être facilement modifiées en ajoutant un poids aux participants ou en modifiant la surface sur laquelle se déroule l'expérience (e.g. Pepping, & Li, 2000).

Proffitt (2006) suggère dès lors que plusieurs facteurs influençant les propriétés du corps à un instant T sont déterminants dans l'estimation des affordances. Ainsi, il a par exemple montré que porter un sac à dos, jeter une balle lourde, courir 5 minutes sur un tapis roulant ou simplement un état de fatigue général (Pijpers, Oudejans, & Bakker, 2007) augmentaient la perception de la pente d'une colline ou d'une distance à parcourir. Globalement, ces facteurs diminuaient l'estimation des capacités d'action d'un individu. Cet effet peut également persister après la réalisation de l'action comme l'ont montré Witt et Proffitt (2005). De manière amusante, ils ont montré que des joueurs de softball rapportaient avoir frappé une balle plus grosse lorsqu'ils avaient mieux joué. De la même manière, les joueurs qui avaient le moins bien joué rapportaient avoir frappé une balle plus petite. Witt, Proffitt et Epstein (2005) ont également montré qu'il était possible de modifier l'estimation des capacités d'action à l'aide d'objets (voir plus loin Higuchi, Takada, Matsuura, & Imanaka, 2004; Stoffregen, Yang, Giveans, Flanagan, & Bardy, 2009). Par exemple, utiliser un bâton pour atteindre un objet donne lieu à une sous-estimation des distances pour les objets à portée et une surestimation des objets hors de portée. Proffitt (2006) suggère également que l'état

émotionnel à un instant T déterminerait l'estimation de ses propres capacités d'action. Ainsi, lorsque les participants sont mis au sommet d'une colline, la pente est également surestimée lorsqu'on induit chez eux une peur de chuter (e.g. tenir sur un skateboard). En terme de stratégie, surestimer la pente d'une colline permettrait dès lors de diminuer l'énergie totale dépensée (e.g. marcher plus lentement ou éviter l'obstacle) ou d'éviter de se mettre dans des situations à risque. Finalement, Schmuckler (1996), suggère que l'expertise serait un facteur critique pour percevoir les affordances non familières (voir plus loin Weast, Shockley, & Riley, 2011) alors que les propriétés du corps seraient plus critiques pour les affordances familières.

Il est également possible d'estimer les affordances chez autrui par observation. Rochat (1995) a par exemple montré que les enfants sont capables d'estimer l'allonge d'un autre enfant ou d'un adulte et d'en tirer profit. Ramezoni, Davis, Riley et Shockley (2010) ont quant à eux suggéré que l'estimation des capacités d'un individu pour une action cible était possible en observant ses capacités pour une autre action fonctionnellement reliée. Par exemple, observer quelqu'un marcher ou soulever un poids d'haltérophilie donnait lieu à une estimation correcte de la longueur et de la hauteur sautée par cette personne, respectivement. De manière intéressante, conformément à la vision action-based, Ramezon, Riley, Davis, Shockley et Armstrong (2008) ont également suggéré que cette estimation n'était pas basée sur des facteurs purement anthropométriques car les individus observés portaient des poids sous leurs vêtements, invisibles pour les observateurs. Weast et al. (2011) ont également montré un effet de l'expertise de l'observateur dans l'estimation des performances d'un joueur de basket. Dans l'ensemble, ils ont observé de meilleures estimations des performances d'un joueur de basket par un joueur expert comparé à un novice. Ces mêmes joueurs experts ont amélioré leurs estimations après l'observation d'une action fonctionnellement reliée au basket alors que les novices n'en n'ont pas profité. Finalement, Richardson et al. (2007) ainsi que Davis, Riley, Shockley et Cummins-Sebree (2010) ont suggéré l'existence d'affordances interpersonnelles qu'ils appellent "affordances d'actions combinées". Leurs participants étaient ainsi capables de d'estimer correctement si une action réclamait la participation d'un autre individu ou encore si elle était réalisable par deux personnes simultanément.

Les affordances sont donc dépendantes des paramètres corporels, physiques ou situationnels à un moment donné dans le temps. Cependant, par définition, cet état n'est que temporaire. Une autre partie de la recherche s'est dès lors intéressée à la capacité d'adaptation à ces changements de capacités d'action, notamment dans des tâches familières et non familières. Mark (1987) a par exemple étudié l'effet de l'ajout d'une cale sous les chaussures des participants dans une tâche de montée d'escalier et d'assise. Dans un premier temps, les participants ne tenaient pas compte des modifications. Après quelques essais, les participants semblaient re-calibrer leurs mouvements pour s'adapter au changement. D'autres auteurs sont arrivés aux mêmes résultats en changeant la localisation ou la hauteur du centre de masse des participants dans des tâches similaires (Wagman, & Malek, 2008; Regia-Corte, & Wagman, 2008, respectivement). Pour des tâches non familières (e.g. se déplacer en chaise roulante), Higuchi et al. (2004) ont observé une surestimation systématique des capacités de passage dans une ouverture qui se sont améliorées après 8 jours d'entraînement sans pour autant

devenir parfaites. Stoffergen et al. (2009) ont quant à eux montré qu'un entraînement de 2 minutes était suffisant pour améliorer les capacités d'estimation de passage dans une ouverture en chaise roulante. Ces auteurs ont observé un net avantage de ces participants par rapport à ceux qui n'avaient pas eu accès à une séance d'entraînement. Des résultats similaires ont été montré concernant l'exploration de l'environnement (Mark et al.,1990) ou pour le caractère préhensible d'un objet (Oudejans, Michaels, Bakker, & Dolné, 1996).

Cette capacité d'adaptation se retrouve également dans le développement humain où, en grandissant, les enfants subissent des changements dans leurs capacités d'action. Gibson et al. (1987) ont par exemple montré que des enfants qui marchent percevaient une différence d'affordance entre deux types de surfaces (i.e. préférence pour une surface plane) alors que des enfants qui rampaient n'avaient pas de préférence. Adolph (1997) a observé des résultats similaires pour l'affordance d'un terrain en pente lors de la transition vers la marche. Lors de cette transition, le nouveau moyen de locomotion de l'enfant donne lieu à des prises de risque plus fréquentes que sur la fin de la période où ils rampaient.

Pour finir, Gibson (1979) affirme : "*We must perceive in order to move, but we must also move in order to perceive*" (p. 223). Cette nécessité de bouger le corps pour percevoir est très bien retranscrite dans la fameuse expérience de la falaise visuelle réalisée par la femme de Gibson (Gibson, & Walk, 1960). Lorsque l'enfant arrive au bord de la falaise visuelle, plusieurs informations contradictoires lui parviennent. Les informations visuelles lui signalent un gouffre infranchissable alors que les informations tactiles l'informent que le sol est solide et franchissable. Le facteur qui prédit le franchissement de l'obstacle est donc la mise en commun des deux informations. Le développement de cette capacité à intégrer les informations des différentes modalités va directement influencer la perception des affordances). En d'autres termes, même si la possibilité d'action est présente dans l'environnement de manière invariante (Gibson, 1979), le choix d'une affordance dépendra également des capacités de perception de l'individu, refermant ainsi la boucle perception-action. O'Regan et Noë (2001) suggèrent également que la vision ne serait pas passive mais bien active dans le sens où "voir" serait une activité basée sur les capacités de l'observateur. Le concept de "contingences sensorimotrices" qu'ils proposent suggèrent une interdépendance entre la disponibilité d'informations sensorielles et les comportements moteurs. En d'autres termes, le système perceptif est dépendant des actions effectuées, qui elles-mêmes sont dépendantes de ce qui est perçu: l'information visuelle est acquise en bougeant et le mouvement modifie l'acquisition d'information visuelle.

Chapitre 2: La perception musicale comme système de traitement d'information

2.1 Conception classique de la perception musicale

2.1.1 Chez les cognitivistes

Influencés par les théories cognitives dominantes dans le domaine de la linguistique (e.g. Chomsky, 1957), Lerdahl et Jackendoff (1983) se sont intéressés à la compréhension de la musique. Leur approche était basée sur l'idée selon laquelle la perception et le traitement de la musique et du langage étaient similaires et se basaient sur une grammaire spécifique: les deux catégories de stimuli impliquaient la construction de structures abstraites à partir d'événements purement auditifs. Ainsi, une grammaire musicale englobe certaines règles qui définissent les structures musicales qui sont accessibles à l'auditeur et relie ces structures à leur équivalent acoustique (Jackendoff, 1995). Lerdahl et Jackendoff (1983) rappellent également que ces grammaires musicales sont rattachées à une culture spécifique. Ils introduisent dès lors la notion d'idiome musical pour exprimer la spécificité de la compréhension musicale dans une culture donnée. Le cadre d'une culture musicale restreindrait la compréhension musicale uniquement dans le cercle de ce qui est familier à cette culture. En d'autres termes, les auditeurs se basent sur une grammaire musicale spécifique à leur culture pour comprendre la musique de leur culture. Il est important de noter que dans le modèle de Lerdahl et Jackendoff (1983), il ne s'agit pas d'une grammaire générative mais bien d'un outil de compréhension de la musique. Il ne s'agit pas non plus de déterminer si un morceau est grammaticalement correct ou incorrect mais plutôt d'un ensemble de principes qui permet de créer des représentations musicales (Jackendoff, 1995).

Conformément aux théories cognitives de l'époque, Lerdahl et Jackendoff (1983) propose un processeur central à travers lequel tous les traitements se déroulent. Ce processeur repose sur différentes opérations (Jackendoff, 1995) qui permettent à l'auditeur de comprendre ce qu'il écoute. Selon Jackendoff (1995), ce processeur central reposerait sur un modèle de traitement de la musique sériel, qui réalise une seule analyse à la fois pour un morceau de musique. Dans son "modèle sériel indéterministique", l'analyse récupère assez d'informations jusqu'à ce qu'une décision finale puisse être prise. Ainsi, les différentes structures sont connectées les unes aux autres uniquement à partir du moment où elles sont correctement identifiées séparément. Selon Jackendoff (1995), ce principe est inhérent au traitement du langage. Une phrase ne peut être comprise que lorsque toutes ces parties (les mots) ont été correctement identifiées.

A un niveau plus bas sur l'échelle temporelle, l'analyse des structures elles-mêmes suivent également ce principe. En linguistique, Marlsen-Wilson (1987) a suggéré que la reconnaissance d'un mot (entendu) se faisait de manière sérielle en comparant le son entendu aux différents mots commençant par le même son. L'analyse se poursuit ensuite en éliminant les candidats qui ne ressemblent plus phonétiquement à ce qui est entendu. Au fur et à mesure que le nombre de candidats diminue, le mot entendu se précise. Lorsqu'il y a assez de

phonèmes entendus pour ne laisser qu'un seul candidat, le mot est reconnu. Dalla Bella, Peretz et Aronoff (2003) se sont intéressés à un tel effet de cohorte dans la perception musicale. En musique, conformément aux principes soulevés par Jackendoff (1995) et Marlsen-Wilson (1987), la reconnaissance d'un morceau de musique se ferait de manière sérielle. Ainsi, ils ont montré que reconnaître un morceau de musique revenait à éliminer les candidats potentiels (i.e. basé sur la similarité auditive) jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'un seul.

Jackendoff (1995) propose également un phénomène d'attente musicale. Dans ce sens, le modèle de cognition musicale qu'il suggère est un outil permettant d'expliquer les attentes musicales d'un auditeur par rapport à ce qui va suivre dans le morceau. De la même manière que la cohorte de candidats potentiels diminue, l'auditeur établit des attentes par rapport à ce qui va suivre. Lorsque ses attentes sont satisfaites dans la suite du morceau, l'auditeur éprouve un affect positif (satisfaction); si ce n'est pas le cas, il éprouve une expérience négative (e.g. surprise ou déception). Ce phénomène serait notamment un des processus clés dans l'induction d'émotions à travers la musique.

A mi-chemin entre les modèles de cohorte et le modèle sériel indéterministique de Jackendoff (1995), Snyder (2000) suggère un modèle de représentation musicale également basé sur sa perception. Selon Snyder (2000), la mémoire pour la musique est divisée en trois étapes: extraction des caractéristiques, mémoire à court terme et mémoire à long terme. Avant qu'un seul traitement cognitif ait eu lieu, la complexité de l'information qui circule dans le système doit être réduite. La mémoire à court terme étant limitée en durée et en capacité, l'information musicale qui parvient par le système auditif est donc simplifiée par des processus de catégorisation perceptive et de regroupement d'événements similaires. Ce regroupement reflète la tendance naturelle du système nerveux humain à assembler des composants qui semblent liés, formant un percept uniforme. Ces percepts une fois catégorisés et regroupés ont une longueur d'environ 3 à 5 secondes, correspondant à des caractéristiques musicales pertinentes telles que la pulsation musicale, le rythme ou la mélodie. À ce stade, cette extraction peut alors évoquer ou activer des expériences antérieures similaires dans la mémoire à long terme (LTM).

De la même manière que Jackendoff (1995) et Dalla Bella et al. (2003), la mémoire à long terme forme un cadre pour l'expérience actuelle sous la forme d'attentes. Ces attentes peuvent ainsi influencer l'orientation de l'attention sur certaines parties de la musique. Snyder (2000) suggère ensuite que l'information qui atteint des états supérieurs d'activation peut persister à l'intérieur de la mémoire à court terme. Si cette information est assez répétée, ses chances d'être intégrée dans la MLT augmentent considérablement. La mémoire à court terme a également pour but de détecter si des motifs répétitifs sont présents dans le flux musical. En d'autres mots, la musique qui présente beaucoup de répétition et respecte une organisation hiérarchique est plus susceptible d'être encodée en MLT que de la musique qui n'a pas cette caractéristique. Pour cette raison, Snyder (2000) a suggéré que la mémoire de la musique est liée à sa structure et à sa perception. Ce processus de mémoire explique également la reconnaissance de la musique car l'extraction de caractéristiques est directement liée à des expériences antérieures; la formation des attentes attire l'attention sur des caractéristiques

pertinentes. En d'autres termes, l'audition d'un morceau active les traces de mémoire compatibles stockées dans la mémoire à long terme pour aider à la traiter.

2.1.2 La perception des structures musicales

Selon Cooper et Meyer (1960), la musique est un flux de sons qui sont organisés de manière hiérarchique suivant des structures temporelles précises qui peuvent être divisées en trois niveaux: la pulsation, la métrique et le rythme. Le niveau hiérarchique le plus bas, la pulsation, consiste en la perception d'une série d'événements réguliers et récurrents qui surviennent en réponse à l'écoute d'un morceau de musique. Il est important de noter que dans cette définition, la pulsation n'est pas une propriété de la musique en elle-même mais serait une construction psychologique (Epstein, 1995; Lerdahl, & Jackendoff, 1983; London, 2004). En effet, les pulsations marquent des moments dans le temps qui sont perçus comme étant temporellement équidistants (isochrones) sans pour autant l'être. Une pulsation manquante peut même parfois être "entendue" en l'absence de son (Palmer, & Krumhansl, 1990), suggérant une simulation mentale de la pulsation. Les pulsations dans la musique sont la plupart du temps accentuées via une hauteur, un volume ou un timbre particulier, ce qui donne lieu à l'alternance de beats forts (accentués) et faibles (voir Large, & Palmer, 2002; Large, 2010).

La régularité de ces beats forts et faibles engendre à son tour le percept de métrique, comme les typiques 4/4 (4 beats par mesure) et 3/4 (3 beats par mesure) utilisés dans la musique occidentale (Cooper & Meyer, 1960; Lerdahl, Jackendoff, 1983; Large, 2008). Brochard, Abecasis, Potter, Ragot et Drake (2003) ont observé que les propriétés temporelles des pulsations donnent lieu spontanément à un regroupement en une structure métrique. Des auditeurs rapportaient percevoir une métrique en l'absence d'accentuations pour différencier les beats fort et les beats faibles. Finalement, le niveau hiérarchique le plus élevé, le rythme, correspond au pattern temporel engendré par le regroupement des événements locaux en comparaison à la métrique ou à la pulsation. Cooper et Meyer (1960) le définissent comme étant " la façon dont un ou plusieurs beats faibles sont groupés en relation avec un beat fort". En d'autres termes, la structure et le caractère régulier du rythme sont dépendants de la régularité (ou non régularité) des niveaux inférieurs et à leur regroupement. Un rythme serait donc l'agencement de différentes unités métriques, elles-mêmes déterminées par un agencement de beats forts et faibles. Cette notion de rythme ne doit pas être confondue avec la notion de tempo qui correspond au nombre de pulsations/beats présents dans une minute (exprimé en Beat Par Minute, BPM).

Comme suggéré par Lerdahl, & Jackendoff (1983), la pulsation musicale serait une construction psychologique. De plus, comme McKinney et Moelants (2006) le suggèrent, cette pulsation est également ambiguë. Ils ont en effet observé que la perception de la pulsation peut varier d'un individu à l'autre et même à l'intérieur d'un même morceau. Afin de mieux cerner la perception de la pulsation, Fraisse (1982) suggère de demander à des participants de réaliser une tâche de tapping en synchronie avec ce qu'ils entendent. Les mouvements produits par les participants seraient dès lors une représentation directe de ce

qu'ils perçoivent. A un niveau fondamental, Fraisse (1982) a observé que de manière générale, la synchronisation avec des événements sonores serait possible entre des intervalles de 200 et 1800 ms (voir également London, 2004, Parncutt, 1994, Moelants, 2002) suggérant également une perception du beat dans cette zone d'intervalles. Au delà de 1,8s (33 BPM) entre les pulsations, il devient difficile de prédire le suivant (e.g. Miyake, Onishi, & Pöppel, 2004). A l'autre extrême, des rythmes dont les pulsations sont séparées de moins de 100ms (600 BPM) ne sont pas perçus comme étant composés d'événements distincts (London, 2004).

Une autre découverte importante de Fraisse (1982) est la notion de tempo "préféré" autour de 120 BPM pour la perception de la pulsation. Il a en effet observé une plus grande précision et facilité à représenter le rythme autour de ce tempo de 120 BPM. De nombreuses études ont par la suite confirmé l'existence d'un "tempo moteur spontané" qui se situerait également autour de 120 BPM, notamment dans des tâches de tapping (e.g. Collyer, Broadbent, & Church, 1994; Moelants, 2002) ou dans la marche spontanée (Mishima, 1965). MacDougall et Moore (2005) montrent en effet que l'activité quotidienne est également rythmée par ce tempo de 120 BPM. Il est important de noter que ce tempo moteur spontané se manifeste en l'absence de stimulation externe (en silence). De manière intéressante, plusieurs études ont établi un parallèle entre ce tempo moteur spontané et le tempo musical (van Noorde, & Moelants, 1999; Moelants, 2002; Styns et al. 2007; Leman et al., 2013). En effet, Moelants et al. (2002) ont rapporté que parmi 74000 morceaux de musique occidentale, le tempo le plus largement représenté tournait autour de 120 BPM. Quant à eux, Leman et collaborateurs (Styns et al., 2007; Leman et al., 2013) ont observé une plus grande précision dans la synchronisation de la marche avec une musique autour de 120BPM.

En résumé, la perception de la musique est avant tout une construction psychologique. En partant du niveau le plus basique de la pulsation, la structure de la musique est perçue et reconstruite sur base des répétitions de patterns réguliers. La capacité à percevoir le beat serait entre autre liée à des facteurs moteurs, indiquant que cette unité de base serait la porte d'entrée vers les mouvements en musique.

2.2 Synchronisation sensorimotrice

2.2.1 Considérations générales

La capacité à se synchroniser avec un rythme externe, notamment étudiée par Fraisse (1982) porte le nom de "synchronisation sensorimotrice" (Repp, 2006). Cette capacité peut sembler éloignée des préoccupations cognitivistes sur la cognition musicale. Cependant, la synchronisation sensorimotrice est indispensable à l'étude de la perception musicale. En effet, la perception des structures musicales étant subjective, son étude requiert des mesures objectives: la synchronisation avec la pulsation musicale (Drake, Penel, & Bigand, 2000). L'étude de cette capacité semble donc une première étape essentielle dans l'étude de la perception de la musique.

Le premier aspect important à noter est que cette synchronisation peut à la fois être automatique (e.g. Repp, 2003a) et contrôlée (voir Repp, 2006 pour une revue). En effet, il est tout à fait possible de supprimer cette tendance à se synchroniser ou ne pas porter attention à un stimulus périodique et taper (tapping) à un rythme différent (Repp, 2006). Une synchronisation non-intentionnelle peut également survenir, surtout dans des situations impliquant des perturbations ou des distracteurs rythmiques (e.g. Repp 2003a) ou dans un contexte social (e.g. Nowicki, Prinz, Grosjean, Repp, & Keller, 2013). Nowicki et al. (2013) ont étudié l'influence du mouvement d'un partenaire visible sur le mouvement d'un participant dans une tâche de tapping. Ainsi, ils ont montré qu'observer quelqu'un réaliser une tâche de tapping perturbe la tâche de tapping du participant et donne lieu occasionnellement à une synchronisation des deux mouvements (participant et partenaire). L'étude de cette synchronisation requiert donc l'examen de la capacité en elle-même et également sa sensibilité à l'interférence.

Cette capacité a été largement étudiée dans la littérature sous la forme du paradigme de tapping et ses variantes (voir Repp, 2006 et Repp, & Su, 2013 pour une revue détaillée). Le terme tapping désigne la réponse motrice qui consiste à toucher de manière répétée une surface avec l'index de la main dominante. Dans sa variante la plus simple, la tâche de tapping requiert la synchronisation de cette réponse motrice avec un stimulus sonore (appelé référent) généralement périodique. Une deuxième variante de la tâche de tapping consiste à combiner une synchronisation avec et sans référent sonore (i.e. tâche de continuation). Ainsi, dans un premier temps, le participant se synchronise avec un référent sonore qui disparaît ensuite. Dans un second temps, le participant doit continuer à produire le même rythme en l'absence de ce référent. Une troisième tâche proche de la précédente fait varier le feedback reçu par le participant. Dans une tâche de pseudo-synchronisation, le participant doit d'abord se synchroniser avec un référent avant que ce référent ne soit remplacé par un feedback sonore de sa propre réponse motrice. En d'autres termes, le participant croit devoir se synchroniser avec un référent externe alors qu'il produit lui même les sons qu'il entend (e.g. Flach, 2005).

Un des paramètres majoritairement étudié est l'étendue des erreurs observées dans une tâche de synchronisation (appelées "asynchronies"). Cette erreur est mesurée en calculant l'écart entre la présentation d'un stimulus et la réponse motrice censée être en synchronie avec ce stimulus. De manière intéressante, ces erreurs sont à la fois aléatoires et systématiques. D'un côté, la capacité à se synchroniser souffre d'une certaine variabilité qui augmente avec l'écart temporel entre deux référents (e.g. Repp, & Doggett, 2007). Ainsi, lorsque l'écart entre les stimuli augmente, l'erreur dans la production motrice augmente également. Cette erreur aléatoire serait due à l'imprécision inhérente au système moteur (Delignières, Lemoine, & Torre, 2004). D'un autre côté, de nombreuses études ont observé des réponses motrices systématiquement anticipées par rapport à l'apparition du référent, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes (voir Aschersleben, 2002 pour une revue). Cette anticipation (appelée *negative mean asynchrony* ou NMA) est également directement proportionnelle à l'écart qui sépare deux référents (e.g. Repp, & Doggett, 2007) et semble se maintenir dans une tâche de continuation (e.g. Flach, 2005). Plusieurs explications à ce phénomène ont été proposées mais encore aujourd'hui, le phénomène n'est pas complètement compris (e.g.

Fraisse, 1982; Wolhschläger, Koch, 2000; Aschersleben, 2002; Białuńska, Dalla Bella, & Jaśkowski, 2011; Repp 2006 et Repp & Su, 2013 pour une revue). Wolhschläger et Koch (2000) ont par exemple proposé une hypothèse perceptive à l'apparition d'une NMA. Plus précisément, ils ont suggéré une sous-estimation perceptive de la durée de l'intervalle entre les référents. Cette sous-estimation systématique donnerait dès lors lieu à une augmentation de la NMA pour des intervalles plus grands. De la même manière, la diminution de l'écart entre les référents entraînerait la diminution de ces erreurs. Cette hypothèse est également en accord avec l'effet de bénéfice de subdivision rapporté par Repp et al. (2003a). Celui-ci suggère en effet que la quantité d'informations autour des référents améliore la précision de la synchronisation (i.e. des intervalles entre référents non vides). Ces résultats suggèrent des mécanismes de prédiction temporelle impliqués dans la synchronisation, impliquant une représentation mentale du temps entre deux stimuli. Ainsi, la réponse motrice du participant serait basée sur la prédiction de la survenue de l'événement suivant (Fraisse, 1982) plutôt que la réaction à l'apparition du stimulus.

2.2.2 Perturbations et mécanismes de correction

Ces deux sources d'erreurs seraient dès lors corrigées via deux mécanismes indépendants qui fonctionnent conjointement dans le contrôle de la synchronisation (Repp, 2006; Repp, & Su, 2013). Une première stratégie consiste à décaler dans le temps la survenue de la réponse motrice sans changer le tempo. Cette correction appelée "correction de phase" est largement involontaire et ne perturbe pas le tempo du tapping. Elle peut se réaliser graduellement (correction à chaque réponse motrice) ou de manière plus brutale en réinitialisant la phase complètement (e.g. en marquant un arrêt). Une deuxième stratégie, volontaire cette fois, la correction de période, consiste à diminuer ou augmenter la période du mouvement, modifiant ainsi son tempo. De la sorte, la réponse motrice serait accélérée ou ralentie pour compenser l'asynchronie avec le référent.

Ces deux mécanismes ne sont bien entendu pertinents que si l'auditeur perçoit, consciemment ou inconsciemment, une asynchronie entre sa réponse et l'apparition du stimulus auditif. Ainsi, les tâches de continuation et de pseudo-synchronisation donnent lieu quant à elles à des effets particuliers. Par exemple, dans une tâche de continuation, plusieurs études ont observé une dérive du tempo de la réponse motrice sans correction apparente. Delignières et al. (2004) ont par exemple suggéré une interdépendance des réponses motrices successives à long terme (i.e. autocorrelation). Selon eux, ce serait le caractère fractal des variations dans une longue série de mouvements qui donnerait lieu à cette dérive. De manière intéressante Delignières, Torre et Lemoine (2009) obtiennent des résultats similaires dans des tâches de synchronisation de très longue durée impliquant plus de 1000 taps. Yu, Russell, Sternad (2003) ont quant à eux proposé une explication en termes de différence entre la dynamique intrinsèque d'un membre et le tempo cible. Ils ont montré une dérive d'un mouvement rythmique vers la fréquence spontanée du participant (i.e. fréquence de résonance), proportionnellement à l'écart par rapport à celle-ci. De plus, ils ont montré une variabilité et une dérive plus faible lorsque les deux fréquences sont proches. La tâche de pseudo-synchronisation quant à elle supprime artificiellement toute forme d'asynchronie. Il en

résulte généralement une accélération de plus en plus rapide de la réponse motrice, indépendamment du fait que le participant soit informé de la manipulation. Flach (2005) suggère que cet effet est le résultat d'une compensation en l'absence de NMA. Flach (2005) a également montré que lorsque le feedback donné au participant était retardé au delà de la NMA, les participants avaient tendance à ralentir à chaque réponse motrice. Ces résultats suggèrent dès lors que les participants percevaient une accélération ou une décélération du référent après la transition vers la pseudo-synchronisation.

A l'exception de l'expérience de Flach (2005) utilisant un paradigme de pseudo-synchronisation, les asynchronies rapportées étaient jusqu'ici non provoquées. Afin d'étudier plus en détails les mécanismes de timing impliqués dans la synchronisation, des perturbations contrôlées ont été introduites dans les tâches de synchronisation. Ces perturbations sont de plusieurs types: globales, locales ou des distracteurs. Lorsque les changements sont généralisés à la tâche (augmentation, diminution ou randomisation des intervalles) les participants semblent être capables de les percevoir et de s'y adapter (phénomène de *tracking*), même lorsque ces variations sont subliminales (e.g. Repp, 2011). Les changements détectables et réguliers donnent lieu quant à eux à des mécanismes de prédiction de la perturbation (e.g. Repp, 2002a).

Les perturbations locales quant à elles font référence à des variations soudaines et non prédictibles qui apparaissent durant la tâche de synchronisation. Elles sont de trois types. Premièrement, le "*phase shift*" consiste à augmenter ou diminuer un seul intervalle en maintenant le même tempo avant perturbation, décalant ainsi tous les référents (e.g. Repp, & Keller, 2008). Ensuite, l' *event onset shift* consiste à faire apparaître un référent plus tôt ou plus tard que sa position prédite par le tempo. L'intervalle suivant est alors diminué ou augmenté afin de maintenir le tempo original pour les référents suivants (e.g. Repp, 2002). Cette perturbation est donc beaucoup plus ciblée car elle n'implique qu'un seul référent qui n'est pas "à sa place". Les asynchronies provoquées par ces deux manipulations donnent lieu à une correction de phase automatique proportionnelle à l'écart par rapport au tempo original. Finalement, le *step change* consiste à augmenter le tempo à un moment donné et le maintenir. Cette perturbation quant à elle, doit obligatoirement donner lieu à une correction de phase et de période pour s'adapter à l'augmentation du tempo (e.g. Repp, 2001). Ces manipulations ont permis de confirmer que la correction de phase était un processus rapide et automatique alors que la correction de période est plus dépendante de la prise de conscience de la perturbation (Repp, & Keller, 2004). Il est intéressant de noter que malgré le caractère imprévisible de ces perturbations, leur répétition au long de l'expérience leur donne un certain degré de prédictibilité (e.g. Repp, 2002b). Ainsi, la correction de phase peut devenir un processus contrôlé (Repp, & Moseley, 2012).

Finalement, dans les paradigmes de distracteurs, un autre référent (distracteur) est présenté de manière conjointe au référent cible. Ces distracteurs sont caractérisés par une phase différente ou un tempo différent (i.e. donnant lieu à une phase différente). Repp (2003a, 2003b) a par exemple rapporté une attraction mutuelle de deux rythmes dont seule la phase les distinguait. Cet effet était d'autant plus prononcé lorsque le distracteur apparaissait moins de

120 ms autour du référent cible (avant ou après). Repp (2006b) a montré des résultats similaires lorsque le distracteur possédait une période différente. De manière périodique, lorsque le distracteur était proche du référent cible, l'asynchronie augmentait. Plus précisément, Repp (2006b) a montré que dans une tâche de continuation, un distracteur dont le tempo était à moins de 5% autour du tempo cible, le participant synchronisait occasionnellement la phase de sa réponse motrice et celle du distracteur. Au delà de 10% du tempo, aucun effet n'a été observé. Repp (2002b) a suggéré qu'en l'absence de correction de phase dans une tâche de continuation, l'apparition de distracteur activerait automatiquement ce phénomène, modifiant ainsi les réponses du participant.

Un paradigme identique a été utilisé par Demos, Chaffin, Marsh (2010) dans l'étude de la synchronisation spontanée avec un référent. Ils ont étudié l'effet d'un tel distracteur sur un mouvement dont la fréquence était déterminée par le participant (self-paced). Ils ont demandé à des participants de se balancer sur une chaise à bascule à leur tempo préféré. Conjointement, les participants entendaient des rythmes avec différents tempi auxquels ils ne devaient pas porter attention. Ces auteurs ont montré une influence des rythmes distracteurs sur les mouvements, notamment sous la forme d'un balancement plus rapide en présence du distracteur. Cependant, leurs résultats n'ont pas clairement montré de synchronisation du mouvement de balancier avec le distracteur. Conformément aux expériences précédentes, seule une relative synchronisation a été observée lorsque le tempo du distracteur était proche du tempo naturel du participant.

En somme, la synchronisation avec un rythme extérieur repose sur deux mécanismes de contrôle : la correction de phase et de période. Le premier mécanisme semble automatique alors que le deuxième se base partiellement sur la prise de conscience d'une asynchronie entre la réponse motrice et le référent. Ces deux mécanismes ont été démontrés dans un contexte normal de synchronisation et également dans un contexte de perturbation.

2.2.3 Mouvements discrets et continus

À la différence des études précédentes, Demos et al. (2010) ont utilisé des mouvements différents des tâches de tapping classiques. En effet, la tâche de tapping implique des mouvements rythmiques *event-based* (appelés aussi "*mouvements discrets*") qui s'appuient sur le moment où le doigt frappe une surface (i.e. l'événement) (e.g. Wing & Kristofferson, 1973). A l'inverse, les mouvements rythmiques impliqués dans la tâche de Demos et al. (2010) ne donnaient pas lieu à un événement marquant à la fin de chaque cycle. Ces mouvements rythmiques (appelés "*mouvements continus*") reposent dès lors sur des processus de timing différents. Ainsi, les mouvements rythmiques continus seraient produits en activant alternativement un groupe musculaire extenseur et fléchisseur, créant une oscillation. Cette activité serait cadencée par deux groupes de neurones spinaux mutuellement inhibés, communément appelés *central pattern generator* (CPG, voir MacKay-Lyons, 2002 pour une revue). Ces générateurs sont notamment impliqués dans la génération de mouvements rythmiques lors de la marche ou de l'oscillation du bras correspondante (e.g. Miall, 2007). La particularité de ce système d'oscillation est qu'il optimise le coût énergétique de tels

mouvements en minimisant l'effort à produire notamment en tenant compte des paramètres inhérents au système moteur (e.g. la gravité, les frottements articulaires, la longueur du membre, etc.) (Todorov, 2004). A l'instar d'un pendule, les mouvements d'oscillations des membres du corps ont également une fréquence de résonance. Cette fréquence de résonance serait majoritairement déterminée par les propriétés du membre utilisé. Ces propriétés forment ce qu'on appelle des "contraintes biomécaniques", suggérant des limitations dans l'utilisation du membre. La fréquence de résonance correspond dès lors à la fréquence à laquelle l'activité musculaire pour maintenir le système en mouvement est minimale (Holt, Jeng, Ratcliffe, & Hamill, 1995). Ainsi, les mouvements rythmiques sont accordés à une certaine fréquence par les CPG (e.g. Verdaasdonk, Koopman, & Van Der Helm, 2006).

Plusieurs études se sont ainsi intéressées à la synchronisation de mouvements rythmiques continus avec un rythme externe (voir Large, 2008). Cette synchronisation se base sur un ajustement des mécanismes d'oscillation afin de s'accorder sur le rythme externe. Torre et Delignières (2008a, 2008b) ont par exemple montré une plus grande variabilité dans la synchronisation à l'aide de mouvements continus comparativement aux mouvements de tapping. Varlet, Marin, Issartel, Schmidt et Brady (2012) ont quant à eux montré une NMA en synchronie avec un stimulus continu (i.e. transition entre deux couleurs) lors d'un mouvement continu à l'aide d'un pendule. L'inverse (i.e. un retard) a été observé lorsque les stimuli étaient discrets. Studenka (2008) ont quant à eux étudié cette capacité de synchronisation avec des mouvements de dessins circulaires. Ils ont montré que les participants dessinaient trop rapidement et ne montraient pas de correction de phase. En rajoutant un feedback sensoriel lorsque les participants effectuaient un tour complet du cercle, les performances s'amélioraient et une correction de phase se mettait en place. Repp et Steinman (2010) ont répliqué ces résultats en montrant une variabilité plus grande dans une tâche de synchronisation à l'aide de mouvements de dessins de cercles et d'autres signes (voir aussi Lorås et al. 2012). Malgré une synchronisation souvent correcte, le couplage sensorimoteur avec un métronome semble plus variable pour des mouvements continus de dessin ou de rotation comparativement au tapping. Concernant la marche, Styns et al. (2007) ont montré que près de 80% des participants ont marché et *tappé* à la même fréquence pour un tempo déterminé par un métronome.

En résumé, les capacités de synchronisation ont été étudiées autant à l'aide de mouvements de tapping (*event-based*) et à moindre mesure à l'aide de mouvements rythmiques continus. Ces derniers donnent lieu à une performance de synchronie identique mais semblent plus variables. Plusieurs auteurs ont suggéré que cette variabilité serait due aux mécanismes de timing sur lesquels ils se basent (e.g. Delignières et al. 2004). La marche quant à elle semble particulière dans le sens où elle combine des caractéristiques *event-based* (appui sur le sol) et continues (oscillations).

2.2.4 Synchronisation sensorimotrice en musique

Dans les études précédemment citées, les matériel utilisé consistait généralement en une stimulation sonore périodique isochrone comme ce qu'un métronome permettrait de produire. La notion de "réfèrent" était dès lors une cible objective avec laquelle se

synchroniser. En musique, la notion de référent est remplacée par celle de pulsation ou de *beat*.

Conformément à l'hypothèse perceptive de l'émergence d'une NMA (Wohlschläger, & Koch, 2000) et au bénéfice de subdivision rapporté par Repp (2003a), plusieurs études ont montré de meilleures performances de synchronisation avec des stimuli musicaux (e.g. Toiviainen, & Snyder, 2003). Snyder et Krumhansl (2001) ont par exemple observé l'absence de NMA dans une tâche de synchronisation avec un matériel musical complexe. Ainsi, la synchronisation est de meilleure qualité lorsque les *beats* sont plus rapprochés ou lorsque l'écart entre eux n'est pas vide. En d'autres termes, l'information rythmique plus riche dans la musique donne lieu à une meilleure prédiction de la survenue du prochain beat comparé à un métronome.

Cependant, cette richesse rythmique dans la musique serait également à l'origine de son caractère ambigu et subjectif. Ainsi, les tâches de synchronisation ont majoritairement été utilisées pour tenter de mesurer le tactus de la musique, le *beat* le plus saillant perçu subjectivement par les auditeurs (e.g. van Noorden & Moelants, 1999; Drake, Penel, & Bigand, 2000). Plus précisément, contrairement aux études précédentes, la plupart de ces études n'ont pas étudié en détails la précision ou les mécanismes de correction impliqués dans une telle tâche. En effet, la question à laquelle ces études tentaient de répondre était de savoir à quel niveau métrique (simple ou complexe) correspondait le tactus perçu par l'auditeur. Ainsi, les réponses motrices des participants servaient à représenter la perception du participant.

Comparativement à un *beat* métronomique, la structure inhérente à la musique la rend plus complexe à traiter. Ainsi, comme l'ont suggéré Patel, Iversen, Chen et Repp (2005), une trop grande complexité donne lieu à des performances de synchronisation moins bonnes et une difficulté à trouver le *beat* ou à reproduire le rythme. Snyder, Hannon, Large et Christiansen (2006) ont par exemple montré une distorsion systématique de la reproduction d'un rythme complexe (2:3) vers un rythme plus simple (1:2) dans une tâche de continuation. Repp (2005b) a obtenu des résultats similaires et les a expliqués en suggérant qu'ils reflétaient la mise en place d'un compromis pour minimiser l'asynchronie globale sur la totalité du cycle rythmique plutôt qu'une asynchronie localisée et plus large. Patel, Iversen, Chen et Repp (2005) ont également montré qu'une structure métrique des pulsations n'améliorait pas spécialement les performances de synchronisation comparé à une pulsation non métrique. Fitch & Rosendfeld (2007) ont quant à eux observé des performances de synchronisation graduellement détériorées lorsque les rythmes présentés pendant la phase de continuation devenaient de plus en plus syncopés (voir également Patel et al., 2005, Snyder, & Krumhansl, 2001). De manière intéressante, Snyder et Krumhansl (2001) ainsi que Toiviainen et Snyder (2003) ont montré que la position métrique de la première note entendue biaisait les participants à se synchroniser avec une phase correspondante.

Drake, Penel et Bigand (2000) ont quant à eux demandé à des participants de taper le tactus de morceaux dont la précision du timing variait en fonction de la façon dont ils étaient

joués (synthétisés, accentués ou joués par un pianiste). Les résultats ont montré que les participants étaient capables de se synchroniser avec un tactus dans les trois conditions. De plus, dans la condition expressive, dont le timing était le plus variable, les participants se synchronisaient bien aux niveaux métriques théoriques (e.g. Rankin, Large et Fink, 2009). Ces résultats suggèrent donc une tendance à rendre isochrone un signal auditif qui ne l'est pas spécialement, reflétant ainsi une perception interne de la pulsation musicale. Cette capacité a également été montrée par Su et Pöppel (2012). Ils ont en effet montré qu'en se synchronisant avec la musique il était plus facile de trouver le *beat* pour des extraits non isochrones. En effet, les participants à qui il était demandé de se synchroniser ont obtenu de meilleures performances en comparaison des participants à qui il était interdit de bouger. Ces premiers participants ont montré une plus grande réussite et également un temps réduit pour trouver le beat musical et le reproduire correctement. Snyder et Krumhansl (2001) ont également montré qu'une plus grande densité d'information contenue dans la musique donnait lieu à un nombre plus faible de beats nécessaire avant que les participants ne le reproduise correctement.

Une caractéristique de la synchronisation avec un stimulus musical est que le beat musical peut être perçu selon plusieurs niveaux métriques, correspondant à une division spécifique de la métrique (e.g. 1:4, 1:2, 1:1; 2:1, etc.). Ainsi, McKinney et Moelants (2006), Martens (2011, 2012) se sont intéressés à ce qui poussait les auditeurs à choisir un niveau métrique ou un autre. Pour ce faire, ils ont demandé à des participants de *tapper* sur le beat de divers morceaux de musique dont les paramètres étaient contrôlés. McKinney et Moelants (2006) ont ainsi suggéré que certaines caractéristiques comme les accentuations sur certains beats étaient déterminants dans le choix du tactus ainsi que le genre musical, entraînant ainsi l'auditeur à se focaliser sur un niveau rythmique plutôt qu'un autre. Martens (2011) quant à lui a suggéré une explication en termes de stratégies de synchronisation. Il a dès lors distingué trois groupes de participants en fonction de leur synchronisation avec la musique. La première stratégie "de surface" consiste à se synchroniser avec la pulsation la plus rapide perçue (i.e. le beat). Ensuite, les "variables" sont des auditeurs qui se synchronisent sur plusieurs niveaux métriques et finalement un troisième groupe représente ceux qui se synchronisent avec des niveaux métriques plus bas (i.e. plus lents). Finalement, Martens (2012) s'est intéressé à l'influence de la vision dans la perception du tactus. Il a montré que dans des conditions où l'image ou la combinaison image/son étaient fournies aux participants, les mouvements des interprètes ont déterminé la fréquence à laquelle le participant a *tappé*. Pour un même tempo, les interprètes ont réussi à biaiser la métrique sur laquelle le participant a *tappé* uniquement lorsque l'image était fournie. L'absence d'image n'a pas donné lieu à un effet de l'intention des interprètes, suggérant que l'information visuelle était prédominante dans l'expression de l'intention. Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude de l'induction du beat par un chef d'orchestre chez les musiciens (e.g. Luck & Nte, 2008; Luck, & Sloboda, 2008, 2009, Wöllner, Deconinck, Parkinson, Hove, & Keller, 2012).

Ces expériences se basent en partie sur un modèle perceptif de la pulsation musicale proposé par van Noorden et Moelants (1999). Ils ont demandé à des participants de *tapper* sur une grande variété de morceaux de musique et ont enregistré le tempo de la réponse motrice. Ils ont dès lors montré un phénomène de résonance perceptive autour de 2Hz ou 120 BPM,

indiquant une plus grande facilité à percevoir le rythme autour de 120 BPM (envisagé par Fraisse 1982 et confirmé par Moelants, 2002). Cette résonance autour de 120 BPM a également été mise en relation avec une résonance motrice de tapping (Moelants, 2002) ou encore dans l'activité quotidienne (MacDougall, & Moore, 2005) et notamment dans la marche (Styns et al., 2007). Moelants (2002) a également montré qu'une grande majorité de la musique occidentale est basée sur un tempo de 120 BPM. Cette notion de résonance motrice se retrouve également dans l'analyse des mouvements rythmiques continus en synchronie avec de la musique. Ainsi, Styns, van Noorden, Moelants et Leman (2007) ont montré une plus grande facilité à se synchroniser avec de la musique autour de 120 BPM. En effet, autour de ce tempo, les asynchronies étaient les plus faibles et au delà de ce tempo, la vitesse de marche des participants n'augmentait plus, seuls les pas étaient plus courts. D'autres études se sont également intéressées aux mouvements de tout le corps en synchronie avec la musique. Ainsi, les études sur la danse ont montré que les mouvements de plusieurs parties du corps étaient synchronisés avec plusieurs niveaux rythmiques (Toiviainen, Luck, & Thompson, 2010), conformément aux contraintes mécaniques imposées par le système moteur. Naveda et Leman (2008, 2009, 2010) ont quant à eux montré que la division métrique était représentée directement dans les mouvements de danseurs professionnels. Finalement, Burger, Thompson, Luck, Saarikallio et Toiviainen (2010) ainsi que Van Dyck et al. (2013) ont montré que la saillance du beat donnait lieu à de meilleures capacités danse en synchronie avec la musique. Cette saillance était améliorée avec la prédictibilité (e.g. bénéfice de subdivision) et le caractère percutant du beat perçu par l'auditeur.

Chapitre 3: La cognition musicale est incarnée

3.1 La cognition musicale incarnée

L'application de concepts cognitivistes à la cognition musicale n'a pas échappée aux critiques quant à sa négligence des facteurs environnementaux et corporels. Plus précisément, les théories cognitivistes éprouvaient des difficultés lorsqu'il s'agissait d'expliquer comment la musique évoque des émotions, nous donne envie de bouger ou permet de surpasser certains troubles moteurs. La cognition musicale incarnée donne donc une place particulière à la phénoménologie de l'expérience musicale qui serait basée sur une interaction entre la musique et le corps (moteur, affectif, expressif, etc.) (Leman, 2008). Cette approche centrée sur le corps élargit le domaine de la recherche musicale en proposant de nouvelles perspectives sur la perception et la compréhension de la musique.

Selon Leman (2008), le corps humain agirait comme un médiateur entre l'esprit et le monde physique (musical). Ce médiateur serait déployé dans l'espace et dans le temps à l'aide des gestes musicaux. Les mouvements musicaux, qu'ils soient internes (simulés) ou externes (danse, hochement de tête, chorégraphie, etc.) ont pour but de donner du sens à ce que l'auditeur entend. Leman (2008) décrit deux types d'implications d'un individu dans l'expérience musicale. Tout d'abord, l'implication *directe* est décrite comme une immersion totale du corps dans l'expérience musicale. Il s'agit par exemple simplement d'être présent à un concert, de ressentir la musique et d'en tirer une certaine satisfaction. Dans ce cas-ci, aucun traitement cognitif, aucune description ou interprétation de la musique n'est mise en œuvre, il s'agit simplement de profiter de la musique pour ce qu'elle procure. La deuxième implication est *indirecte* et correspond aux traitements plus cognitifs (dans le sens cognitiviste) qui sont possibles sur la musique. Ainsi, l'auditeur met en place des traitements cognitifs (e.g. description verbale de la musique), diminuant l'immersion³.

Selon Leman (2008) toujours, l'expérience musicale serait similaire à une interaction sociale dans le sens où être impliqué en musique (implication *directe*) reviendrait à entrer en communication. Il s'agirait ici d'une communication entre l'auditeur et l'interprète, voire même les autres auditeurs (e.g. concert). De manière intéressante, la fonction du corps dans cette interaction serait de décoder les actions et mouvements qui ont donné lieu à ce que Leman appelle les "*moving sonic forms*". En d'autres mots, les mouvements de l'interprète riches de sens ont été encodés dans sa production musicale et le corps servirait à décoder le sens que l'interprète y a attaché. Un bel exemple de ce décodage a été fourni par Leman, Desmet, Styns, van Noorden et Moelants (2009) dans une étude sur le transfert d'expressivité entre un instrumentiste et un auditeur. L'intérêt de cette étude reposait dans le fait que les participants n'avaient aucune connaissance sur l'instrument utilisé (le *guqin*, une cithare chinoise) et ne voyaient pas l'instrumentiste. La tâche des participants était de retranscrire de manière motrice (en bougeant un joystick) ce qu'ils entendaient. Leman et al. (2009) ont dès lors observé des

³ Cette deuxième implication dans la musique se rapproche plus de la vue cognitiviste décrite précédemment et ne fait donc pas l'objet de ce chapitre.

patterns de vitesse et d'accélération similaires entre les mouvements de l'instrumentiste et ceux de l'auditeur. L'interprétation des auteurs tient dans le décodage des informations auditives en informations motrices. Ainsi, les participants auraient simulé mentalement les mouvements produits par l'interprète sur base des sons entendus (résonance motrice). La simulation de ces mouvements engendrerait dès lors l'accès aux émotions de l'interprète par résonance perceptive et donnerait lieu à des mouvements caractéristiques. Par conséquent, les mouvements produits par l'auditeur seraient le reflet de ceux de l'interprète (voir également Sievers, Polansky, Casey, & Wheatley, 2013).

Les mouvements des auditeurs peuvent également influencer le ressenti à l'écoute d'un morceau par un phénomène de résonance perceptive. Ainsi, plusieurs études ont démontré une plus grande préférence pour des morceaux pendant lesquels les participants ont hoché la tête (Sedlmeier, Weigelt, & Walther, 2011), réalisé un mouvement d'approche ou sourit artificiellement (voir Strack et al., 1988). L'effet inverse a été observé pour les mouvements évoquant des affects négatifs. Les affects véhiculés par ces manipulations ont dès lors modifié l'appréciation des morceaux de musique par conditionnement. À la suite de ces travaux, Maes et Leman (2013) ont récemment suggéré qu'au delà de l'observation (e.g. Martens, 2012), les mouvements effectifs des participants pouvaient induire chez eux des émotions spécifiques. Ils ont dès lors observé que des chorégraphies "joyeuses" ou "tristes" biaisaient la perception de l'émotion perçue dans un morceau de musique au caractère expressif ambigu. Les mouvements effectués pendant l'écoute et la production musicale auraient enrichi la représentation créée lors de l'encodage d'un événement musical. Van Dyck, Maes, Hargreaves, Lesaffre et Leman (2013) ont suggéré que les émotions ressenties par un auditeur pouvaient également donner lieu à l'expression de mouvements associés à une émotion particulière. Les participants devaient bouger en rythme sur un morceau de musique dont le caractère émotionnel était ambigu. Ainsi, les participants "heureux" bougeaient plus rapidement et de manière plus expansive et impulsive que les participants "tristes", suggérant que l'émotion a influencé la façon dont les participants ont bougés.

Lorsque l'information visuelle est accessible aux auditeurs (e.g. concert), la communication entre l'interprète et l'auditeur est renforcée (Schutz, 2008). Schutz (2008) et Platz & Kopiez (2012) suggèrent ainsi que la vision joue son rôle dans le jugement d'une performance musicale. Plus précisément, l'observation de l'interprète serait cruciale dans la compréhension de l'expressivité d'un morceau. Davidson (1994) a par exemple montré que les mouvements d'oscillation du haut du corps suffisaient pour juger l'expressivité d'un interprète, même par des non musiciens. Davidson (1993) a également montré que le son, l'image et leur combinaison permettaient de juger correctement trois types d'expressivité (i.e. aucune, normale, exagérée). Dahl et Friberg (2007) ont montré que les participants pouvaient, sans avoir accès aux expressions faciales du musicien, reconnaître des intentions émotionnelles en relation avec la tristesse, la joie, la colère mais pas la peur. Nusseck et Wanderley (2009) ont montré des résultats similaires à l'aide de courts extraits de mouvements de clarinettiste. De plus, la modification de l'amplitude de certains mouvements de manière informatique (immobile ou exagérée), n'a pas perturbé la capacité des participants à juger correctement certains paramètres de l'interprétation comme l'intensité, les tensions ou encore le

professionnalisme de l'interprète. Comme l'a suggéré l'expérience de De Bruyn, Leman, et Moelants (2008) la vision d'autres partenaires impliqués dans l'expérience musicale également une influence sur les performances motrices. Ils ont montré une plus grande synchronisation avec la musique et des mouvements plus vifs dans un contexte social comparé à une situation d'isolation. Les enfants qui se voyaient mutuellement dansaient plus intensément et en meilleure synchronie que séparément.

Comme l'ont suggéré Nusseck et Wanderley (2009), au delà des affects et de l'expressivité, le professionnalisme d'un interprète semble également être encodé dans ses gestes et est accessible à l'auditeur. Récemment, Rodger, Craig, O'Modhrain (2012) ont examiné la contribution de la vue et de l'audition dans la perception de l'expertise d'un musicien. Ils ont dès lors montré qu'elle se baserait à la fois sur la vue et l'audition. L'expertise d'un instrumentiste expert était jugée la plus grande lorsque les musiciens et non musiciens avaient accès au son et à l'image combinés. Tsay (2013) a quant à lui suggéré que c'est la vision qui domine dans l'évaluation de la performance. L'expertise d'un instrumentiste était mieux jugée sur base de la vision uniquement. L'écoute de la musique ou son ajout à la vidéo a donné lieu à des performances plus faibles. Vines, Krumhansl, Wanderley, Dalca et Levitin (2011) ont quant à eux suggéré une interaction entre les modalités utilisées et la capacité à juger une performance. De manière intéressante, ces résultats suggèrent que pour le jugement de la même composante d'un événement musical, les différentes modalités peuvent rentrer en interaction (voir Platz, & Kopiez, 2012; Schutz, 2008 pour une revue des effets de la vision sur la perception de la performance musicale).

Selon Jensenius, Wanderley, Godøy et Leman (2009), ces mouvements observés font partie d'une catégorie particulière de mouvements musicaux. En effet, Jensenius et al. (2009) différencient quatre types de mouvements relatifs à la musique. Comme nous venons de voir, une première catégorie concerne les mouvements de production de la musique. Directement liés à ces mouvements sont les mouvements dits "ancillaires" qui ne participent pas directement à la production du son mais sont des variations subtiles de l'exécution des notes qui donnent un caractère expressif à la performance musicale (Wanderley, & Depalle, 2004). Troisièmement, les mouvements de communication sont effectués à des fins de communication entre les différents musiciens d'un ensemble ou face à une audience. La dernière catégorie de mouvements musicaux regroupe les mouvements dits "d'accompagnement". Ceux-ci ne sont pas liés à la pratique d'un instrument mais sont les mouvements qui sont associés au son écouté de manière libre (Jensenius et al., 2009).

La dernière catégorie est particulièrement intéressante car elle ne relève pas d'une quelconque compétence artistique ou instrumentale. En effet, les mouvements des deux premières catégories sont typiquement produits par des musiciens. La troisième catégorie (i.e. mouvements communicatifs) appartient quant à elle à un registre plus social, plus facilement accessible par les novices. Les mouvements d'accompagnement sont quant à eux souvent spontanément produits en réponse à la musique (Keller, & Rieger, 2009). Leman (2008) ajoute que ces mouvements spontanés en réponse à la musique seraient issus de l'estimation de la survenue de moments plus énergétiques dans le flux musical, correspondant aux beats et

aux patterns rythmiques dans la musique. Selon Leman (2008), ces mouvements d'accompagnement sont influencés par trois composantes : la synchronisation, l'harmonisation incarnée (*embodied attuning*) et l'empathie. Ces trois niveaux diffèrent en termes d'engagement dans la musique et dans la complexité des interactions auditori-motrices qu'elles impliquent. La synchronisation correspond au premier niveau d'interaction avec la musique. Il s'agit de la forme la plus simple d'engagement qui se manifeste par une synchronisation temporelle des mouvements du corps avec les décharges d'énergie dans le flux musical (cf. synchronisation sensorimotrice). Cette synchronisation peut dès lors donner lieu à ce que Leman appelle la *résonance inductive* qui correspond à un engagement plus actif dans le contrôle, l'imitation et la prédiction des mouvements servant à représenter la pulsation musicale (cf. résonance motrice). La seconde composante, l'harmonisation incarnée se caractérise par un engagement en rapport à des structures musicales de plus haut niveau comme la mélodie, l'harmonie, le rythme ou le timbre de la musique. Plus complexe que la synchronisation, les mouvements associés à ces structures permettraient de mieux les comprendre. Finalement, l'empathie est la composante qui relie les mouvements du corps avec l'intentionnalité, l'expressivité et les émotions véhiculées dans la musique. Ici encore, les mouvements associés serviraient à les imiter et les comprendre (e.g. Leman et al., 2009).

La synchronisation dont Leman (2008) parle se rapproche très fort de la synchronisation sensorimotrice dont il a été question précédemment. Cette interaction avec la musique consisterait simplement à se synchroniser avec la musique ou plus précisément la pulsation musicale. Cette forme la plus simple est généralement celle qui s'observe de manière spontanée lorsque les gens bougent sur la musique. L'unité de base, la pulsation musicale servirait dès lors de support aux mouvements des participants. En effet, Toiviainen et al. (2010) ont montré que le beat ou tactus était la référence utilisée pour se synchroniser avec la musique (voir également Styns et al. 2007). Les participants réalisaient des mouvements cycliques basés sur des périodes de deux pulsations. Les détails cinématiques des mouvements ont en effet montré que l'énergie potentielle moyenne du mouvement se situait tous les beats et atteignait son maximum autour de l'apparition du deuxième beat. De plus, l'énergie potentielle du système était à son minimum autour de l'apparition du premier beat. En d'autres termes, la descente du mouvement vertical associé au tactus se fait sur le premier beat et la remontée sur le deuxième. Toiviainen et al. (2010) ont également mis en évidence la répétitivité de mouvements cycliques sur deux beats. Plus précisément, ces mouvements étaient caractérisés par un aller et un retour, tous les deux synchronisés avec le tactus. Naveda et Leman (2008, 2009, 2010) se sont également intéressés aux mouvements de danse dans la Samba et le Charleston. Dans un premier temps, leur démarche était de développer un outil d'analyse du mouvement permettant d'examiner le déploiement des mouvements dans le temps en relation avec la structure musicale et son déroulement temporel. Leur outil, appelé Topological Gesture Analysis (TGA), a dès lors permis de montrer que les mouvements de danse de professionnels étaient également cycliques, réguliers et représentaient majoritairement des périodicités de deux beats. Cette période de deux beats semble donc optimale pour représenter la pulsation musicale, le premier beat correspondant à la moitié du cycle et le deuxième beat à la fermeture du cycle. Les autres niveaux métriques ont également leur importance comme le suggère Toiviainen et al. (2010). En effet, ils ont observé une

hiérarchisation des mouvements spontanés en réponse à la musique en fonction du niveau métrique. Des mouvements plus amples et plus lents servaient à reproduire des niveaux métriques plus bas (1 beat sur 4 par exemple) alors que des mouvements rapides servaient à représenter le beat. Ces auteurs suggèrent donc que plusieurs niveaux métriques peuvent être représentés de manière simultanée chez des novices. Cette synchronisation avec plusieurs niveaux métriques serait en quelque sorte une décomposition de la structure de la musique.

Le niveau de l'harmonisation incarnée et de l'empathie se référant à des structures musicales plus complexes que la pulsation musicale, on pourrait s'attendre à ce qu'ils requièrent une certaine connaissance académique de la musique. Cependant, comme Godøy, Haga et Jensenius (2006a, 2006b) ainsi que Leman et al. (2009) l'ont suggéré, les novices ont également accès à ce niveau de compréhension de la structure musicale. Godøy, Haga, Jensenius (2006a) se sont intéressés aux mouvements effectués en réponse à la musique en dehors d'un contexte de danse. Plus particulièrement, la tâche des participants (appelée *sound-tracing*) était de décrire des mouvements dans le vide afin de représenter la musique comme ils la percevaient. Ils ont montré une corrélation entre les variations dans la musique et des variations dans les mouvements effectués par les participants. De la même manière, Leman et al. (2009) se sont penchés sur la capacité des participants à retranscrire l'expressivité de la musique en mouvements du bras. Ils ont montré que les mouvements des participants se sont révélés être similaires à ceux du musicien au niveau des accélérations et des patterns de vitesse. Godøy, Haga et Jensenius (2006b) quant à eux se sont intéressés aux mouvements d'imitation d'instrumentiste, couramment appelés "*Air Playing*" (i.e. jouer dans l'air). Ces auteurs parlent du terme "*motormimetic sketching*" qui reflète deux aspects du mouvement: son imitation des gestes de productions de la musique (*motormimetic*) et également sa relative approximation dans l'imitation (*sketching*). Ils ont demandé à des novices et à musiciens experts de tenter d'imiter un pianiste jouant des morceaux connus. Les résultats ont montré que les mouvements des novices comme ceux des experts étaient relativement synchrones par rapport au morceau et respectaient les changements de dynamique. Les experts se sont différenciés des novices en insistant sur des points plus techniques du morceau. En somme, les novices se sont focalisés sur l'émotion alors que les experts se sont focalisés sur la technicité.

En somme, certaines caractéristiques musicales comme la métrique, la pulsation ou encore les émotions exprimées semblent être directement accessibles aux auditeurs lors de l'écoute. Comme l'a suggéré Leman (2008) avec ses trois niveaux d'engagement, les mouvements représenteraient des variations dans différentes caractéristiques de la musique et auraient pour fonction de mieux comprendre la structure de la musique et son expressivité.

3.2 Le cycle perception-action en musique

Un des principes clé développé dans les théories sur le lien réciproque entre perception et action est l'intégration d'informations motrices et perceptives dans une représentation partagée (e.g. Prinz, 1997; Hommel et al. 2001). Ces deux types d'informations peuvent dès

lors rentrer en interaction de manière offline ou online et produire des effets d'assimilation (facilitation) ou de contrastes (interférence).

La musique étant intrinsèquement liée au mouvement (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007 pour une revue), elle constitue donc un objet de prédilection pour l'étude de l'interaction entre perception et action. Pour rappel, l'interaction entre la perception et l'action peut prendre deux formes différentes: la résonance motrice et la résonance perceptive. La résonance motrice correspond à la façon dont la perception active les commandes motrices nécessaires à l'atteinte d'un tel état perceptif (e.g. Jeannerod, 1994; Prinz, 1997; Rizzolatti et al. 2001). A l'inverse, la résonance perceptive correspond à la façon dont l'action active des états perceptifs (Hommel, et al. 2001). La recherche dans le domaine musical a majoritairement étudié l'effet de résonance motrice (e.g. l'évocation de mouvements par la musique) mais ce n'est que récemment que l'effet des mouvements sur la perception a été examiné (résonance perceptive). Cette section sera dès lors divisée en deux parties distinctes, chacune traitant d'un type d'interaction (résonance motrice et perceptive).

3.2.1 Résonance motrice

L'idée d'un effet de résonance motrice en musique suggère l'activation de représentations motrices à l'écoute d'un morceau de musique. L'activité motrice qui sous-tend cette représentation peut faire référence à deux activités distinctes : produire de la musique ou bouger en rythme avec la musique.

En ce qui concerne les gestes de production de musique, un certain nombre d'études ont suggéré que ces gestes étaient directement liés aux représentations auditives, notamment chez des musiciens. Keller, Knoblich et Repp (2007) ainsi que Repp et Knoblich (2004) se sont par exemple intéressés à la capacité de pianistes à reconnaître leur propre performance comparée à celle d'un autre. Ils ont démontré que des pianistes étaient capables de reconnaître leur propre performance de manière auditive même lorsque celle-ci était modifiée et atténuée pour ne laisser que l'articulation et la temporalité expressive, les participants arrivaient également à reconnaître leur propre performance (Repp, & Knoblich, 2004). De plus, même lorsque les pianistes n'entendaient pas ce qu'ils jouaient lors de l'enregistrement (production silencieuse), leur capacité à identifier leur production était maintenue, suggérant un lien fort entre l'action réalisée et le son qui en résulte. Keller et al., (2007) montrent quant à eux que lorsque des pianistes qui doivent se synchroniser avec un enregistrement musical sont plus performants avec leur propre enregistrement que lors d'une synchronisation avec autrui.

Dans le même ordre d'idée, Brown et Palmer (2012) ont exploré un potentiel bénéfique d'un apprentissage audio-moteur sur des morceaux de musique nouveaux. L'idée principale était d'associer spécifiquement des gestes à un épisode d'apprentissage afin de créer une représentation multi-modale (auditive et motrice) du morceau et faciliter sa récupération en mémoire. Brown et Palmer (2012) ont ainsi observé des performances de reconnaissance plus élevées lors d'un apprentissage audio-moteur que lors d'un apprentissage purement auditif ou purement moteur. Lors de la tâche de reconnaissance, l'écoute de ces morceaux aurait dès lors donné lieu à une simulation motrice et auditive de l'épisode d'encodage. De manière intéressante, Brown et Palmer (2012) n'ont pas trouvé de bénéfice de mémorisation lorsque

les participants apprenaient de manière motrice en entendant un enregistrement du morceau (i.e. ils n'entendaient pas leur propre performance). Keller et al. (2007) ont quant à eux montré que des pianistes qui jouaient sur un clavier silencieux étaient capables de reconnaître leur production en entendant les sons produits par leur performance pour la première fois. Ces résultats suggèrent dès lors, comme Prinz (1997) le suggérait, qu'il est nécessaire que les participants perçoivent les sons entendus comme provenant de leurs propres actions pour qu'un lien se crée entre le mouvement et sa conséquence (auditive) (cf. Zwickel et al. 2010).

De nombreuses études d'imagerie cérébrale ont supporté cette idée de partage d'une représentation motrice et auditive dans le cadre de l'écoute musicale. Par exemple, Haueisen et Knösche (2001) ont montré une activité cérébrale frontale associée à des zones motrices et prémotrices lors de l'écoute de musique chez des sujets musiciens experts. D'autres études ont également démontré que l'activité prémotrice en réponse à des stimuli musicaux était proportionnellement liée à l'entraînement musical du musicien, montrant une réponse cérébrale plus forte chez des experts (e.g. Lotze, Scheler, Tan, Braun, & Birbaumer, 2003; Bangert et al., 2006). De la même manière, Calvo-Merion, Grèzes, Glaser, Passingham et Haggard (2006) ont démontré un lien direct entre l'appartenance d'un mouvement au répertoire de l'observateur et l'activation des zones motrices. Ces auteurs ont par exemple montré qu'observer un danseur d'un autre style de danse donnait lieu à une activation prémotrice largement inférieure à l'observation d'un danseur dans le style de l'observateur.

Ce lien entre perception et action peut également se créer très rapidement dans le cadre d'un apprentissage musical. Lahav, Saltzman et Schlaug (2007) ont par exemple observé qu'une période d'entraînement de 5 jours au piano était suffisante pour instaurer une activation du système miroir à l'écoute des morceaux appris. Ils ont également montré que les mêmes notes placées dans un ordre différent ne donnaient pas lieu à une activité miroir, renforçant ainsi l'idée de sélectivité du système miroir pour des mouvements issus d'un répertoire. Bangert et Altenmüller (2003) ont quant à eux observé des MEP plus importants lors de l'écoute d'un morceau de musique répété pendant seulement 20 minutes. Après un apprentissage d'une durée similaire, Lahav, Katz, Chess et Saltzman (2013) ont montré une influence de l'écoute d'un morceau nouvellement appris sur sa reproduction une semaine plus tard. Ils ont montré une meilleure rétention et reproduction chez les participants qui ont périodiquement écouté (sans reproduction) le morceau appris pendant une semaine comparé aux participants qui ont effectué une autre tâche ou écouté des sons non musicaux. Après un apprentissage encore plus court, D'Ausilio, Altenmüller, Olivetti Belardinelli et Lotze (2006) ont quant à eux montré des MEP plus importants lors de l'écoute d'un morceau appris pendant à peine 30 secondes. Finalement, chez des sujets non musiciens, Popescu Otsuka et Iannides (2004) ont également montré une activité cérébrale du système miroir lors de l'écoute musicale. Ces résultats montrent donc que l'écoute musicale active la composante motrice initialement associée à l'épisode d'encodage.

Comme l'ont suggéré Drost et collègues (Drost, Rieger, Brass, Gunter, & Prinz, 2005; Drost, Riger, & Prinz, 2007), cette composante motrice peut s'avérer interférente en fonction de sa congruence avec la tâche. Drost et al. (2005) ont par exemple demandé à des pianistes d'écouter un son particulier juste avant de commencer à jouer un morceau au piano. La

manipulation des auteurs consistait à faire entendre au pianiste la première note du morceau ou une note différente. Les auteurs ont dès lors observé des temps de réaction plus longs lorsque la note présentée était incongruente avec le début du morceau (Drost et al., 2005) que lorsqu'elle était congruente. Ainsi, ces résultats suggèrent que la représentation motrice de la note incongruente aurait interféré avec la production de la note qui commence le morceau. De manière intéressante, cet effet n'a été observé que lorsque la première note entendue et la note à jouer partageait le même timbre. En d'autres termes, une note à la guitare ne perturbe pas une interprétation au piano (Drost et al., 2007).

Conformément à la théorie du codage commun (Hommel et al. 2001), ces expériences suggèrent que des perceptions auditives musicales peuvent évoquer chez l'auditeur des représentations motrices dont le degré de spécificité peut varier.

3.2.2 Résonance perceptive

De manière complémentaire à la résonance motrice, une résonance perceptive dans un contexte musical suggère que des mouvements effectués en présence de musique évoqueraient des perceptions relatives aux conséquences de ces gestes et à leurs caractéristiques. En effet, Bangert et al. (2006) ont par exemple observé une activité cérébrale dans le cortex auditif chez des musiciens experts jouant sur un piano silencieux.

Comme c'était le cas hors d'un contexte musical, les effets de résonances motrices « musicaux » sont typiquement étudiés à l'aide de stimuli musicaux ambigus. Ainsi, en se basant sur l'expérience de Wohlschläger (2000), Repp et Knoblich (2007, 2009) ont étudié l'effet de la direction d'un mouvement sur la perception du caractère montant ou descendant d'une paire de note chez des novices (2009) et chez des pianistes experts (2007). Leur point de départ était l'association qui est faite entre la direction d'un mouvement sur un clavier de piano et le caractère "montant" (droite) ou "descendant" (gauche) de la hauteur d'une paire de note. Ils ont observé que déplacer la main de gauche à droite donnait lieu à une perception montante des notes et inversement pour un mouvement de la main de droite à gauche. Ainsi, les mouvements de la main dans une direction ou une autre auraient été mis en correspondance avec un clavier de piano sur lequel les notes seraient jouées. De manière remarquable, cette représentation spatiale semble également être présente chez les novices (2007) et est activée lors de l'observation de cette même action par l'expérimentateur (2009).

La perception d'autres paramètres musicaux semble également influencée par ce lien entre perception et action. Phillips-Silver et Trainor (2005, 2007), par exemple, ont montré que des mouvements rythmiques réalisés pendant l'écoute d'un rythme ambigu donnaient lieu à un biais dans l'interprétation de la métrique (3/4 ou 4/4) de ces rythmes ambigus (i.e. dont il manque les accentuations). Ces auteurs ont montré que lors d'une tâche de reconnaissance, les participants rappelaient avoir entendu un rythme correspondant spécifiquement aux mouvements effectués. Un résultat similaire était obtenu dans un paradigme de préférence chez des jeunes enfants (Phillips-Silver, & Trainor, 2005). L'enfant préférait les rythmes nouveaux, qui ne correspondaient pas aux mouvements qui lui avaient été imposés (mouvements passifs) pendant l'écoute d'un rythme ambigu. La représentation des sons entendus était donc le résultat de l'intégration de l'information auditive et motrice. Des

recherches ultérieures ont suggéré que cet effet était attribuable à des facteurs vestibulaires (Phillips-Silver, Trainor, 2005, 2008; Trainor, Gao, Lei, Lehtovaara, Harris, 2009) impliqués dans les mouvements réalisés pendant l'écoute.

La perception de la pulsation musicale semble également être sensible aux mouvements réalisés pendant l'écoute. Récemment, Su et Pöppel (2012) ont par exemple démontré qu'il était plus facile de trouver le beat d'une chanson lorsque les participants bougeaient sur la musique. Comparativement, la vitesse et la précision avec laquelle le beat est trouvé et reproduit était réduite lorsqu'il était interdit aux participants de bouger. Les auteurs suggèrent que les mouvements réalisés spontanément à l'écoute de la musique ont permis d'améliorer la perception du beat. Ils expliquent ce phénomène en termes de rôle facilitateur des mouvements dans la perception des régularités dans la musique. Su et Jonikaitis (2011) suggèrent que la perception de cette pulsation musicale est également sensible à l'observation de mouvements. Ils ont été jusqu'à montrer que les mouvements pouvaient être fictifs et purement visuels. Ainsi, un flux de mouvements qui accélère donne lieu à une perception d'un tempo plus rapide et inversement pour un flux de mouvement qui décélère. Cet effet semble s'observer également dans une tâche de reproduction de rythme où les participants reproduisent des rythmes plus rapides que ceux qu'ils ont entendus.

Comme l'ont suggéré Leman et al. (2013), les émotions musicales semblent également être étroitement liées aux mouvements musicaux. Ainsi, Maes et Leman (2013) ont montré que les mouvements de danse réalisés lors de l'écoute de musique avec un caractère expressif ambigu biaisaient la perception de celle-ci. Ils ont demandé à des enfants de réaliser deux types de chorégraphies, joyeuse ou triste, sur des morceaux expressivement ambigus. Ils ont montré que les mouvements de danse ont biaisé la perception de l'émotion retranscrite dans ces morceaux. Le caractère joyeux ou triste de la chorégraphie a donc biaisé la perception de l'émotion exprimée par le morceau de musique.

Ces études se sont majoritairement focalisées sur la " dés-ambigu-ation " de stimuli auditifs en termes de hauteur de note, de structure métrique et d'expressivité. Todd (1999) et Todd, Lee, O'Boyle (2002) quant à eux suggèrent dans leur théorie sensorimotrice que la simple perception de la pulsation musicale est un phénomène intrinsèquement sensorimoteur car il réclamerait également l'intervention du système moteur en plus du système auditif. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, au-delà des représentations motrices d'actions précises, la perception est également liée aux contraintes imposées aux corps. L'idée défendue par Todd et al. (2007) est que la simple perception du beat serait dépendante de certains facteurs anthropométriques individuels. Plus précisément, il suggère que le beat préféré d'un participant serait dépendante de la rythmicité des mouvements de marche de chacun et que celle-ci peut être prédite à l'aide de facteurs anthropométriques (e.g. le poids, la taille, etc.). Dahl, Huron, Brod et Altenmüller (2014) ont également montré que des facteurs anthropomorphiques étaient déterminants dans la façon dont les individus "*groovaient*" sur la musique. En d'autres mots, en fonction des proportions corporelles ou encore du sexe, les gens préfèrent bouger sur la musique de façon différente.

3.3 La musique donne envie de bouger

3.3.1 Le groove ou l'envie de bouger en musique

La musique possède une qualité qui nous donne envie de bouger, qui nous pousse à se synchroniser avec elle. Cette qualité est couramment appelée *le groove*. Le groove est un terme qui a d'abord été utilisé en musicologie et ethnomusicologie (Pressing, 2002) en tant que qualificatif musical. Le concept de groove est défini par Madison (2006) en tant que "envie de bouger une partie du corps en relation avec certains aspects des patterns musicaux". La musique peut avoir cette qualité qui nous donne envie de bouger mais le groove n'est pas une propriété intrinsèque à la musique. Il s'apparente plutôt aux propriétés rythmiques d'un morceau en relation avec les mouvements réalisés pendant son écoute (Feld, & Keil, 1994; Iyer, 2002).

Expérimentalement, Madison (2006) ainsi que Janata, Tomic et Haberman (2012) se sont intéressés à la description que les auditeurs faisaient du groove. Afin d'isoler le percept de groove, Madison (2006) a demandé à des participants de juger le degré de groove de 64 morceaux de musique différents, dans différents genres musicaux. Il a observé que le groove était relié à la notion de *driving* (qui incite le mouvement), *rocking* (qui balance), la joie et *ayant du swing*. Il a également observé une grande consistance dans les évaluations des participants concernant les différents descripteurs, suggérant que le percept de groove est une expérience commune aux auditeurs et serait liée à certaines propriétés de la musique. Janata et al. (2012) quant à eux ont demandé à leurs participants de choisir plusieurs phrases permettant de décrire ce qu'était le groove pour eux. Les résultats ont suggéré que le percept de groove seraient en lien avec l'envie de bouger, le sentiment d'appartenance à la musique, la présence d'un beat soutenu, l'emphase mise sur certains beats plutôt que d'autres (downbeats vs offbeats), le tempo, la précision du timing, la répétition d'un pattern rythmique ou encore l'état émotionnel dans lequel on se trouve. D'autres études sur les musiciens ont également montré que les musiciens utilisent le terme groove pour désigner un état agréable pendant la création musicale où tout paraît facile, sans effort. Ainsi, autant pour les musiciens que les auditeurs, la notion de groove serait proche de la notion de *flow* qui décrit deux choses : 1) des actions qui deviennent automatiques et qui ne requièrent que très peu voire aucune ressource attentionnelle et 2) un état émotionnel positif (e.g. de Manzano, Theorell, Harmat, & Ullen, 2010). Todd (2001), Janata et al. (2012) et Madison (2006) ont également rapporté que la notion de groove et l'écoute de musique rythmique étaient associés à un sentiment agréable, positif et à de l'amusement. Grewe, Nagel, Kopiez et Altenmüller (2007) arrivent aux mêmes résultats en montrant que le très connu "Soul Bossa Nova" de Quincy Jones (lequel était associé au mot "comique") est celui qui a donné le plus envie de bouger aux participants. De manière intéressante, Janata et al. (2012) montrent que l'estimation du groove d'un morceau n'a pas de lien avec sa familiarité. Des morceaux inconnus peuvent être aussi « groovy » que des morceaux connus. Leman et al. (2013) montre également que le caractère connu ou inconnu d'une chanson n'influe pas sur l'évaluation de son caractère énergisant-relaxant, suggérant que l'expérience du groove n'est pas liée une connaissance particulière de la musique.

Si la perception du groove paraît consistante parmi les auditeurs, il semble également que certains morceaux ne "groovent" pas du tout. Afin de mieux comprendre ce phénomène, plusieurs recherches se sont intéressées aux propriétés acoustiques en lien avec la perception du groove. Janata et al. (2012) ont par exemple observé que les morceaux rapides (115 ± 8 BPM) ont donné une évaluation de groove plus importante que les morceaux lents (90 ± 6 BPM). Cependant, une analyse plus poussée de leurs résultats a montré que le tempo absolu ne serait pas un indicateur de groove en soi mais qu'il s'agirait plutôt de la quantité d'informations auditives données à l'auditeur. Ainsi, Madison, Gouyon, Ullén et Hörnström (2011) ont suggéré que la répétition de patterns rythmiques et la densité d'informations à l'intérieur d'une mesure, indépendamment du tempo de la musique, sous-tendraient la perception du groove et auraient un effet sur l'évocation de mouvements chez les auditeurs. Madison et al. (2011) ont ainsi suggéré que lorsqu'il n'y a qu'un seul niveau métrique (e.g. métronome), il doit s'opérer un compromis entre les intervalles courts permettant une précision temporelle accrue et les intervalles longs plus difficiles à prédire. A l'inverse, un rythme plus riche au niveau métrique (i.e. plus d'événements sonores dans une mesure) donnerait des informations complémentaires qui se renforceraient mutuellement, donnant ainsi lieu à une plus grande saillance de la pulsation. Les intervalles plus courts fourniraient de l'information supplémentaire au système auditif alors que les intervalles plus longs permettraient la mise en place des mouvements de synchronisation (Madison, 2009).

Burger et al. (2013) ont quant à eux suggéré que cette répétition des patterns rythmiques et la saillance de la pulsation dans la métrique permettraient l'apparition d'un sentiment de régularité dans le flux musical. Cette régularité rendrait dès lors la musique plus prédictible et les mouvements évoqués par la musique plus réguliers. Ces auteurs montrent en effet qu'une plus grande régularité des patterns temporels dans la musique donne lieu à des mouvements plus réguliers, aussi bien au niveau spatial que temporel. D'autres études ont suggéré que cette régularité peut également être perçue lorsque la pulsation n'est pas isochrone (i.e. des pulsations non métriques dont les patterns se répètent, aussi appelés "syncopées") et donner lieu à une sensation de groove dans la musique (e.g. Sioros, Miron, Davies, Goyon, & Madison, 2014). Tous ces résultats sont consistants avec d'autres études qui suggèrent que la présence de différents niveaux métriques augmenterait la saillance d'une pulsation, donnant ainsi un "bénéfice de subdivision". (e.g. Parncutt, 1994; Repp, 2003a; London, 2004; Styns et al. 2007).

En d'autres termes, le percept de groove proviendrait donc de la richesse rythmique qui augmente la saillance de la pulsation et sa régularité perçue et permettre une meilleure synchronisation. Cette meilleure synchronisation va à son tour augmenter le sens du groove en renforçant le sentiment d'appartenance à la musique. Janata et al. (2012) montrent en effet que la synchronisation des gestes avec la musique sous la forme d'une tâche de tapping va augmenter la sensation de groove chez les participants mais uniquement avec des morceaux dont le groove est considéré comme élevé.

Leman et al. (2013) quant à eux ont fait l'hypothèse que certaines caractéristiques musicales donnent "*plus envie de bouger*" que d'autres dans une tâche de marche synchronisée à un rythme musical. Dans une précédente expérience, Styns et. (2007) mentionnaient le

groove comme étant un facteur qui pourrait expliquer les changements de dynamiques dans la marche synchronisée à un rythme musical (p. 783). Conformément aux expériences sur le groove précédemment mentionnées, ces auteurs ont montré que les participants synchronisaient leur marche plus facilement avec un stimulus musical qu'avec un métronome (voir Repp, 2003a pour des résultats similaires dans une tâche de tapping). Ils ont également observé de manière intéressante que les participants parcouraient de plus grandes distances lorsqu'ils se synchronisaient avec la musique. En d'autres termes, lorsqu'ils sont synchronisés avec de la musique, leurs pas sont plus amples que lorsqu'ils sont synchronisés avec un métronome. Leman et al. 2013 ont dès lors manipulé le caractère énergisant-relaxant des morceaux sur lesquels les participants avaient à marcher en synchronie. Leurs résultats ont révélé un ensemble de 4 paramètres acoustiques permettant d'expliquer la taille du pas en synchronie avec la musique. Ils ont démontré que des fluctuations dans ces paramètres donnaient lieu à une musique relaxante alors qu'une absence de variation donnait lieu à une musique énergisante.

Très récemment, Dalla Bella, Białuńska et Sowiński (2013) ont montré de manière élégante en quoi la régularité de la musique attirait plus le mouvement que la parole. Ces auteurs ont montré que des extraits de paroles dont la rythmicité, la métrique et l'isochronie avaient été modifiées pour correspondre à une structure musicale interféraient avec une tâche de synchronisation sensorimotrice. Selon eux, le caractère régulier des stimuli vocaux a donné lieu à une interférence car il a interagi directement avec le système moteur de la même manière que la musique dans la tâche de synchronisation motrice.

3.3.2 Les affordances musicales

Madison (2006) décrit le *groove* comme " une envie de bouger une partie du corps en relation avec certains aspects des patterns musicaux". Le groove refléterait donc une compatibilité entre les caractéristiques de la musique et les propriétés du corps. ou en d'autres termes, une *affordance musicale* (Godøy, Haga, & Jensenius, 2006a, 2006b ; Godøy, 2009, 2010). Chaque individu percevrait dans la musique ce qui lui permet de supporter un mouvement (i.e. ce qu'elle lui *offre*), en fonction de ses capacités ou d'autres facteurs corporels. Ainsi, en écoutant de la musique, un grand nombre de mouvements différents peuvent être mis en place. Par exemple, certains auditeurs se synchronisent avec le beat d'un simple mouvement de tête. D'autres peuvent également imiter le guitariste lors d'un solo de guitare ou encore décrire des mouvements dans les airs en fonction des variations de la musique. En ce sens, la musique peut être vue comme un support, une invitation au mouvement, différente selon chaque individu.

Comme le suggère Clarke (2005), notre système auditif rentrerait en résonance avec le système moteur en présence de musique (résonance motrice). Selon lui, ce seraient les changements et variations inhérentes à la musique qui feraient office de « support » aux mouvements. Clarke (2005) prend l'exemple de l'Effet Doppler pour clarifier son propos dans le sens où entendre les modifications sonores typiquement associées à cet effet nous fait reconnaître de manière auditive le passage d'une ambulance par exemple. Ainsi, entendre ces variations dans la musique produirait une *perception de mouvement*. Clarke (2005) et Godøy

(2010) suggèrent également tous les deux que la musique véhiculerait des informations concernant la source du son. En d'autres termes, la musique évoquerait les mouvements qui ont servi à la produire.

En suggérant la musique comme étant un vecteur d'informations sur sa source, Godøy (2010) fait en fait plus référence à des techniques de production communes à différents instruments que des correspondances strictes entre les mouvements de l'interprète et de l'auditeur. Ainsi, le mouvement utilisé par un pianiste pour frapper une touche serait du même ordre qu'un batteur frappant sur sa batterie (i.e. de haut en bas). De la même manière que pour les affordances "classiques", les connaissances écologiques musicales seraient donc constituées de schémas moteurs génériques applicables dans différentes situations et représentant des propriétés communes à plusieurs instruments (Godøy 2006a). Dans leur tâche de "*sound-tracing*", Godøy et al. (2006a) ont demandé aux participants de représenter ce qu'ils entendaient sous forme de tracés dans l'air et ont observé une bonne correspondance entre les variations dans la musique et les mouvements effectués (Haga, 2008). De la même manière, comme Godøy et al. (2006b) l'ont rapporté, certaines connaissances spécifiques à un instrument peuvent également être retranscrites. Ces auteurs ont demandé à des novices et pianistes experts d'imiter un pianiste en train de jouer un morceau connu. Ils ont montré que l'association entre la hauteur d'une note et son emplacement horizontal sur le clavier était respectée autant par les novices que par les experts (voir Repp, & Knoblich, 2007, 2009 et Lidji, Kolinsky, Lochy, & Moray, 2007). Il en va de même pour les mouvements communicatifs comme le suggèrent les compétitions de *Air Guitar* où les compétiteurs n'hésitent pas à "faire leur show". En d'autres termes, ces connaissances écologiques regrouperaient la production de sons dans sa globalité physique, expressive et communicative.

Comme Clarke (2005), Godøy (2010) suggère que les caractéristiques les mieux représentées par les mouvements en musique étaient celles qui variaient dans le temps. En effet, Haga (2008) a observé une grande disparité dans la représentation en « *sound-tracing* » d'une simple note de musique ou d'un très court extrait musical. Ainsi, les départs et arrêts, les pulsations, les patterns cycliques, les accentuations, le timbre, etc. sont tous des paramètres caractérisés par une variation quantifiable dans le temps. De la sorte, la capacité à faire correspondre un mouvement à une musique se baserait sur une mise en correspondance des variations dans la musique et des mouvements (e.g. Mitchell, & Gallaher, 2001).

Godøy (2009) suggèrent trois types de variations dans le flux musical issus de trois types de mouvements. La forme que prennent ces variations et le mouvement associé serait déterminée par les contraintes imposées au système moteur. En effet, comme l'a suggéré Toiviainen et al. (2010), la représentation de certaines structures musicales est limitée par ce dont le corps est capable. Premièrement, les mouvements *itératifs* correspondent à des petits mouvements rapides et répétitifs (e.g. mouvements de tête) alors que les mouvements *impulsifs* seraient plus irréguliers, plus amples et plus violents (e.g. l'apparition soudaine d'un son de batterie). A mi-chemin entre les deux, les mouvements *soutenus* correspondraient quant à eux à des oscillations régulières, des allers et retours constants entre deux positions (e.g. les mouvements d'oscillation de tout le corps). Godøy (2009) a dès lors suggéré que ces

mouvements représenteraient ce qu'il appelle des "chunks" du flux musical. En d'autres termes, l'auditeur diviserait la musique en plusieurs unités qui ont du sens, tant au niveau de la perception que des mouvements qui l'accompagnent. Ces divisions seraient de l'ordre d'une demi seconde (e.g. pulsation à 120 BPM) à 5 secondes (e.g. rythme, mélodie) et constitueraient les unités mises en place en réponse à la musique, correspondant chacune à une structure différente. En bref, la musique fournirait donc des informations sur la façon dont elle a été produite. Les mouvements qui l'accompagnent seraient donc caractérisés par la même dynamique, la même temporalité et spatialité (Haga, 2008). Cette notion est proche de celle d'isomorphisme (e.g. Decety et Jeannerod, 1995), suggérant que les contraintes du système moteur étaient intégrées dans l'imagerie motrice. De la même manière que les contraintes biomécaniques déterminent les sons possibles à produire, ces mêmes contraintes déterminent les gestes possibles à produire pour l'accompagner. Cependant, comme l'a suggéré Godøy (2009), il ne s'agit pas de correspondance directe mais plutôt des mouvements génériques, permettant de représenter les différentes structures indépendamment de l'instrument entendu et de l'effecteur utilisé. La façon dont les mouvements représentent une façon commune de jouer un instrument se rapproche de la notion d'équivalence motrice suggérée par Kelso et al. (1998). Selon celle-ci, les schémas moteurs seraient indépendant des effecteurs utilisés. Il est dès lors possible d'écrire un mot sur le sol avec son pied. De la même manière, les mouvements utilisés pour produire des sons musicaux seraient indépendants des effecteurs utilisés.

La mise en place d'un certain type de mouvement à la place d'un autre semble également dépendante des connaissances de l'auditeur. Selon Godøy (2010), cette capacité à identifier la source et la "reproduire" reposerait sur les nombreuses occurrences où un individu perçoit la musique et un mouvement correspondant (réalisé ou observé) de manière simultanée. Il en résulterait une connaissance "écologique" de la musique, permettant à l'auditeur de construire une représentation de la façon dont le son a été produit ou comment il est reproduit. L'étendue et la précision de ces connaissances écologiques seraient dès lors liées à l'expertise de l'auditeur. Par définition, les experts possèdent une plus grande connaissance écologique de l'association entre musique et mouvement (i.e. un plus grand répertoire, cf. neurones miroirs). Cette différence entre experts et novices en termes de mouvements induits par la musique est observable dans l'expérience de Godøy et al. (2006b). Dans une tâche de Air Playing (i.e. faire semblant de jouer), les experts se focalisaient sur la technicité du morceau alors que les novices se contentaient de retranscrire son expressivité. L'information technique n'étant pas accessible aux novices, ils ont imité les mouvements expressifs du pianiste. L'expertise jouerait donc un rôle dans la qualité des connaissances écologiques sur des aspects complexes de la perception mais aurait peu d'importance pour des tâches simples.

La façon dont ces mouvements représentant des variations dans le flux musical sont produits repose dès lors sur la capacité des auditeurs à réaliser les bons mouvements aux bons moments. Ce que l'étude du groove a suggéré est que la structure musicale et plus particulièrement le beat (la pulsation) est essentielle pour une synchronisation sensorimotrice avec la musique. Cette correspondance entre musique et mouvement implique donc de traiter ces mouvements comme *goal-directed*, suggérant ainsi un objectif temporel et spatial à

atteindre (e.g. Godøy, 2009, 2010; Godøy et al. 2006a, 2006b; Naveda, & Leman 2008, 2009, 2010; Toiviainen et al., 2010). En d'autres termes, les structures musicales seraient des guides à l'action, indiquant le moment dans le temps où chaque mouvement doit se terminer, représentant ainsi des "objectifs". Godøy (2009, 2010) a suggéré que ces mouvements étaient en fait une succession de positions initiales et finales et que les mouvements intermédiaires étaient l'expression de la trajectoire optimale entre ces deux positions dans un laps de temps précis. Naveda et Leman (2008, 2009, 2010) ont également démontré que les mouvements des bras et des pieds de danseurs professionnels suivaient ce principe. Leurs mouvements étaient cycliques, réguliers et représentaient majoritairement des périodicités de deux beats. Plus précisément, en prenant comme point de référence ces périodes de deux beats, les positions initiales et finales étaient situées au même endroit dans l'espace et dans le temps. Les mouvements intermédiaires d'aller et de retour étaient en synchronie avec la pulsation. Toiviainen et al. (2010) ont montré des résultats similaires chez des novices. Ils ont montré un pattern similaire autour de la périodicité de deux beats pour les mouvements du bras. Leur analyse cinématique des mouvements induits par la musique a indiqué que l'objectif à atteindre dans les mouvements du bras serait une énergie potentielle minimum autour de l'apparition du second beat. Tel un batteur qui frappe sur sa batterie, le bras prend de l'élan (premier beat) avant de percuter l'instrument sur le deuxième beat. Comme nous l'avons vu précédemment, ces mouvements seraient également hiérarchisés en fonction des contraintes qui leur sont imposées, en respectant la structure musicale (Toiviainen et al., 2010).

En résumé, la musique serait une affordance dans le sens où elle invite au mouvement. Les simulations mentales dont il a été question depuis le début de ce chapitre correspondraient aux paramètres dynamiques, spatiaux et temporels des mouvements de production des sons et leur variation dans le temps. L'attractivité du mouvement pour la musique viendrait dès lors de la perception des correspondances entre ces paramètres et les propriétés intrinsèques du corps de l'auditeur. Comme dans la théorie écologique de la perception (Gibson, 1979), un choix quant à saisir l'affordance ou la laisser doit s'opérer. Dans le domaine de la musique, ce choix reviendrait à estimer le coût de se synchroniser (ou non) avec une structure particulière ou une autre. Ces différentes structures sont toutes présentes dans le flux musical, l'auditeur les percevrait en fonction de ses capacités motrices. Ainsi, une musique trop rapide ou trop lente pour un auditeur *n'afforderait* pas de mouvement. Cette idée est également reprise par Todd, Cousins et Lee (2007) lorsqu'ils suggèrent que les préférences musicales seraient entre autres basées sur les capacités motrices d'un individu. Ces auteurs montrent que 16% de la variance observée dans les préférences musicales de différents individus étaient explicables par plusieurs facteurs anthropométriques. Récemment, Dahl, Huron, Brod and Altenmüller (2014) arrivent aux mêmes conclusions en montrant que des facteurs anthropométriques et le sexe déterminaient la façon dont les gens bougeaient en musique. La capacité des auditeurs à produire un mouvement au bon moment dans le flux musical proviendrait du fait que les simulations mentales seraient composées de trajectoires dans le temps, fixant ainsi des objectifs spatio-temporels à atteindre. Les auditeurs feraient dès lors correspondre ces objectifs avec des éléments saillants dans le flux musical : les structures musicales, en commençant par la pulsation.

Au delà des mécanismes impliqués dans l'engagement musical, cette affordance musicale aurait également une valeur fonctionnelle. Comme le montrent Janata et al. (2012) ainsi que d'autres recherches sur le *groove*, cette synchronisation avec la musique donnerait lieu à des affects positifs. D'autres expériences ont montré que la synchronisation (i.e. *entrainment*) augmentait la cohésion sociale et représentait la forme la plus simple de communication interpersonnelle (e.g. Merker, Madison, & Eckerdal, 2009 ; Phillips-Silver, Aktipis, & Bryant, 2010 ; Valdesolo, Ouyang, & DeSteno, 2010 ; Wiltermuth, & Heath, 2009; voir Sevdalis, & Keller, 2011 pour une revue). Comme dans l'expérience de De Bruyn et al. (2008), les enfants qui rentraient en interaction en écoutant de la musique étaient en meilleure synchronie avec la musique, augmentant ainsi la synchronie entre eux. Ainsi, en simulation mentalement l'action de l'interprète, l'auditeur rentrerait en quelque sorte en communication avec lui. De plus, comme l'a suggéré Leman (2008), les mouvements en musique seraient réalisés pour améliorer leur compréhension, en leur donnant du sens. Une affordance musicale serait également le reflet de cette nécessité qu'a l'homme à donner du sens à son environnement pour interagir avec celui-ci de manière efficace.

Objectifs de la thèse et Hypothèses

Cette thèse a pour but d'étudier le lien entre musique et mouvement à travers les mouvements induits par la musique. D'un côté, l'influence des mouvements induits par la musique sur la cognition a très peu, voire pas du tout été étudiée. Ce travail de thèse se fixe dès lors comme objectif d'en savoir plus sur les implications cognitives de ces mouvements et comment ils modifient la représentation d'un événement d'encodage de musique nouvelle. D'un autre côté, ces mouvements induits par la musique semblent posséder une caractéristique naturelle et irrésistible. Le deuxième objectif fixé par cette thèse est d'étudier les interactions entre les perceptions auditives et le système moteur des auditeurs. Plus précisément, la deuxième partie de la thèse s'intéresse à l'interférence que peut produire la perception auditive d'un rythme sur des mouvements d'oscillations. La particularité de ces mouvements d'oscillation est qu'ils sont contraints de manière naturelle à une période de fonctionnement déterminée par des facteurs anthropométriques et propres à chacun.

La thèse se divise donc en deux parties distinctes. Une première partie s'intéresse à l'impact des mouvements induits par la musique sur la cognition. La deuxième partie s'intéresse, à l'inverse, à l'influence de la perception de rythmes sur les mouvements produits.

Première partie

Etude 1: Comment la production de mouvements induits par la musique influence la rétention de nouveaux morceaux de musique.

Question: Bouger en rythme avec la musique permet-il de mieux la retenir?

Les théories cognitives classiques prédisent une meilleure rétention d'informations lorsque celles-ci sont encodées de deux manières (dual coding, Paivio, 1977) et également lorsqu'un traitement profond y est associé (Craik & Tulving, 1975). Cette vision de la mémoire est également partagée par les théories incarnées de la cognition. En effet, la mémoire encoderait toutes les informations modales relatives à un événement d'encodage (Glenberg, 2010). Ainsi, bouger sur la musique produirait un encodage plus riche dans le sens où le morceau de musique serait associé à une composante motrice (e.g. Brown & Palmer, 2012). Il en résulterait des performances de reconnaissance plus élevées lorsque les participants ont bougé sur la musique. Les mouvements produits en musique serviraient d'indice de rappel lors d'une écoute ultérieure du morceau encodé.

Nous avons proposé de tester cette hypothèse en constituant plusieurs groupes de participants ayant comme tâche soit de bouger sur la musique, soit de rester immobile lors de son écoute. Les performances mnésiques des participants dans chaque groupe ont été testées à l'aide d'un test de reconnaissance.

Question: Focaliser l'attention des participants sur la production de mouvements liés à certaines caractéristiques musicales améliore-t-elle la reconnaissance spécifique de certains morceaux ?

Les mouvements induits par la musique peuvent être de nature diverse. Certaines personnes ont par exemple tendance à se synchroniser avec la pulsation musicale alors que d'autres imitent les instruments de musique qu'ils entendent ("Air Playing", e.g. Godoy et al. 2006). L'attention portée sur certains composants de la musique plutôt que d'autres pourrait dès lors avoir un effet sur la rétention de certains morceaux dans lesquels ces composants sont plus saillants.

Nous avons proposé de tester cette hypothèse en choisissant des paires d'extraits dont les affordances varient. En d'autres termes, chaque morceau de musique serait associé à un "leurre" (distracteur) qui se différencie de la cible d'une façon plutôt qu'une autre. Les deux différences choisies entre les morceaux cibles et distracteurs sont l'Instrumentation et le Groove. Ces deux caractéristiques musicales sont associées à des mouvements différents lorsqu'elles varient, permettant ainsi de rendre la différence entre cible et distracteur plus saillante.

Nous avons donc demandé aux participants soit de bouger sur la musique de manière spontanée soit d'imiter les instruments de musique qu'ils entendaient. Selon notre hypothèse, les participants qui dansent seraient dès lors plus sensibles aux changements de Groove entre une cible et un distracteur. De la même manière, les participants qui imitent les instruments de musique joués seraient plus sensibles aux changements d'Instrumentation entre cible et distracteur.

Afin de répondre à la question posée, nous avons choisi des stimuli musicaux qui pouvaient intégrer des changements d'instrumentation et de groove à l'intérieur d'un même morceau pour maintenir une certaine similitude entre la cible et le distracteur.

Etude 2: Comment la production de mouvements induits par la musique influence la rétention d'informations contextuelles liées à l'encodage

Question: Bouger en rythme sur la musique améliore-t-il la rétention d'informations contextuelles liées à l'encodage d'un morceau (i.e. mémoire de source)?

Le contexte dans lequel une information est encodée contribue grandement à sa rétention ultérieure. Ainsi, un contexte plus riche donne lieu à de meilleures performances mnésiques. Nous avons voulu tester cette hypothèse dans un contexte de mouvements rythmiques en musique. L'hypothèse soutenue dans cette étude est que bouger en rythme sur la musique rend le contexte d'encodage plus riche comparé à une absence de mouvements. Il en résulterait une meilleure rétention du contexte d'encodage lorsque les participants ont bougé en rythme sur la musique.

Ce contexte d'encodage a consisté en deux informations non reliées: la tâche réalisée par le participant (bouger/ ne pas bouger) ainsi que l'espace dans lequel la tâche a été réalisée

(gauche/droite). Selon un design intra-sujet, les participants bougeaient/ne bougeaient pas en rythme avec la musique dans la partie gauche/droite de la pièce.

La tâche des participants était dans un premier temps de déterminer si un morceau avait été entendu dans la phase d'encodage. S'ils répondaient positivement, il leur était demandé d'identifier le contexte dans lequel le morceau a été entendu (tâche/espace).

Les morceaux de musique utilisés étaient identiques à ceux de la première étude.

Question: Le Groove d'un morceau permet-il de le différencier d'un autre?

Afin de répondre à cette question, nous avons réalisé un post-test après que le participant ait répondu au test de mémoire d'item et de source. Conformément à la notion que deux morceaux ayant des "groove" différents évoquent des mouvements différents, nous avons demandé aux participants de juger les paires d'extraits cible/distracteurs. Leur jugement a porté sur le degré selon lequel les deux morceaux d'une paire cible-distracteur évoquaient des mouvements différents.

Ces jugements ont été mis en relation avec les performances individuelles de chaque participant concernant les rejets corrects et les fausses alarmes. En effet, la différence entre la cible et le distracteur ne peut s'exprimer que lors de l'écoute de morceaux nouveaux (distracteurs).

Deuxième partie

Etude 3: Comment la perception musicale influence la production de mouvements rythmiques

Question: Comment sont organisés les mouvements d'oscillation produits de manière naturelle?

Afin de répondre à cette question, nous proposons de réaliser une étude cinématique de plusieurs mouvements d'oscillation. Ces mouvements d'oscillation ont la particularité de dépendre de circuits neuronaux spinaux imposant un fonctionnement optimal à une fréquence précise. A l'image d'un pendule, ces mouvements seraient accordés à une fréquence particulière en fonction de certains paramètres anthropométriques comme la longueur du membre utilisé ou sa masse. L'hypothèse concernant l'organisation de ces mouvements est qu'ils sont organisés de manière hiérarchique en fonction de leur caractère distal et proximal. Ainsi, les mouvements d'oscillation produits par des membres dont la longueur et la masse sont plus faibles (plus distaux, e.g. l'avant bras comparé au bras entier) devraient osciller plus rapidement que des membres dont la masse est plus importante (membres proximaux).

Plusieurs mouvements d'oscillation ont été sélectionnés pour les membres inférieurs et supérieurs. Ainsi, l'analyse cinématique a porté sur l'oscillation : du bras entier, de l'avant-bras, du poignet, de la jambe entière et de la jambe à partir du genou. Une tâche de tapping a été ajoutée afin de maximiser le caractère distal du mouvement et également parce qu'elle est

sous-tendue par des mécanismes de timing différents des mouvements d'oscillation précédemment cités.

Question: La perception de musique rythmique influence-t-elle de manière distincte les différents mouvements d'oscillation en fonction du membre utilisé?

Chaque membre étant caractérisé par une fréquence d'oscillation propre (déterminée par ses caractéristiques biomécaniques), nous avons voulu tester l'hypothèse selon laquelle ces membres seraient influencés de manière différente en fonction de leur fréquence d'oscillation. Par un mécanisme de résonance motrice, la perception musicale produirait des percepts de mouvements qui pourrait rentrer en interaction avec la production effective d'un mouvement.

Afin de répondre à cette question nous avons demandé aux participants de produire des mouvements d'oscillation en même temps que la présentation d'une musique rythmique. Une manipulation importante a consisté à faire augmenter le tempo de la musique au fur et à mesure de sa présentation. Cette manipulation a permis de faire varier l'interaction entre la musique et le mouvement.

Les mouvements sélectionnés étaient l'oscillation du bras entier, de l'avant bras, de la jambe à partir du genou et également une tâche de tapping. L'intérêt de la tâche de tapping est qu'elle requiert des mécanismes de timing différents des mouvements d'oscillation, permettant ainsi d'examiner l'influence différentielle de la musique sur les deux mécanismes de timing.

Plusieurs questions spécifiques ont également été abordées et l'analyse a été réalisée en gardant à l'esprit l'hypothèse principale. Premièrement, nous nous sommes intéressés à l'influence de l'apparition et la disparition de la musique sur le maintien d'un mouvement d'oscillation par les participants. Deuxièmement, nous avons tentés de dégager plusieurs stratégies mises en place par les participants afin de s'adapter à la musique. Finalement, nous avons recueilli les sentiments des participants sur la tâche en elle-même en se focalisant sur les moments plus faciles et difficiles.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Première étude : How does moving along to music influence its later recognition?

Peckel Mathieu ⁽¹⁾, Bigand Emmanuel ⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Bourgogne, Dijon, France.

Abstract

The present study addressed whether moving along to music can enhance its later recognition. According to the notion of musical affordances, participants should be able to move along to music without any previous knowledge of it. Furthermore, the literature on embodied music cognition and musical affordances suggest that perception of music is strongly linked to the action schemata associated with it. Accordingly, when hearing a song, movement patterns that are associated with it should be accessed and act as a memory cue. Participants were either requested to move along to music (Dancing), to imitate playing an “air instrument” (Mime) or simply to listen to the musical excerpts (Listening). Results showed that participants in the Listening condition performed better than participants in the Dancing and Mime conditions. The performances in the Dancing and Mime conditions did not differ. Our results suggest that these participants were able to move along with music but did not create a multimodal representation of the learning event. We argue that these participants processed music in a shallower and more perceptual fashion than listeners. Our results are discussed in terms of involvement in the motor task and depth of processing related to the expression of musical affordances.

Keywords: musical affordances, music perception, dance, air-instrument, memory, embodied music cognition

Comment bouger sur la musique influence sa reconnaissance ultérieure?

Peckel Mathieu ⁽¹⁾, Bigand Emmanuel ⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Bourgogne, Dijon, France.

Résumé

Cette étude visait à déterminer si bouger sur la musique améliore sa reconnaissance ultérieure. Selon la notion d'affordance musicale, les participants devraient être capables de bouger sur la musique sans aucune connaissance préalable de celle-ci. De plus, la littérature sur la cognition musicale incarnée et les affordances musicales suggèrent que la perception de la musique est étroitement liée aux schémas moteurs qui lui sont associés. Ainsi, lors de l'écoute d'une chanson, les patterns moteurs qui lui sont associés devraient être activés et servir d'indice mnésique. Les participants devaient bouger sur la musique (Danse), faire semblant de jouer un « Air Instrument » (Mime) ou simplement écouter les extraits musicaux (Ecoute). Les analyses ont montré que les participants dans la condition Ecoute ont obtenu de meilleurs résultats que les participants dans les conditions Danse et Mime. Les performances dans ces deux dernières conditions ne différaient pas. Nos résultats suggèrent que ces participants ont été capables de bouger sur la musique mais n'ont pas créé de représentation multimodale de la phase d'apprentissage. Nous soutenons que ces participants ont traité la musique de manière plus superficielle et perceptuelle que les participants dans la condition Ecoute. Nos résultats sont interprétés en termes d'implication motrice dans la tâche ainsi qu'en termes de profondeur de traitement associée à l'expression d'affordances musicales.

Mots-clés: affordances musicales, perception musicale, danse, Air Instrument, mémoire, cognition musicale incarnée

1. Introduction

Listening to music makes us want to move. Whether it is through head bobbing, foot tapping, swaying or more elaborate movements, the tendency of people to engage physically with music seems to have an automatic and irresistible quality to it (Janata, Tomic, & Haberman, 2012). This motor involvement with music seems to be the most common way through which people tend to interact with music and usually result in an enjoyable experience. This feeling of an urge to move in response to music and the resulting enjoyment is commonly described as “being in the groove”. Janata et al. (2012) recently studied this notion of *groove* and its implication on music cognition. Interestingly, they found that the concept of groove was highly associated with “*the extent to which the music makes you want to move*” and “*the extent to which you feel you are part of the music*” (p. 4). The groove of a musical piece has many synonyms and descriptions but they all agree on the fact that it refers to rhythmic properties of the musical piece and/or the timing relationships of actions of individuals interacting with the music (Keil, & Feld, 1994; Iyer, 2002). In other words, the feeling of groove relies on the matching between the actions of the individual and the rhythmic properties of the musical piece.

According to Godøy (Godøy, Haga, Jensenius, 2006; Godøy, 2009, 2010), this audio-motor interaction can be understood within the framework of musical affordances, a term taken from the ecological approach of visual perception proposed by Gibson (1979). According to Gibson, the visual perception of an object leads to the automatic detection of relevant physical properties that are compatible with the individual’s body and action capabilities. In other words, individuals tend to automatically assess the action potentialities that the environment can offer. For example, when seeing a ball, individuals tend to automatically assess its “play-ability” or “grasp-ability”. If the ball is too big, the individual would perceive its playability as lower than a ball that would perfectly fit in its hand. Nevertheless, its playability is not to be considered as an inherent property of the ball as it depends on the individual interacting with it. Its playability thus lies in the relation between the ball and the action possibilities that the object offers to an individual. Gibson further stated that affordances are inherent to the stimulus from an individual point of view and do not require elaborate processing of the stimulus. Individuals have to seize the action opportunity afforded by the object or leave it. If the individual chooses to take the opportunity, his action would directly be tuned to the object. In summary, an affordance is not an action by itself but rather the relation between an object (i.e. perception) and the capacity for action of a specific organism (i.e. potentialities) (Cummins, 2009). In that sense, if music makes us want to move, it might be due to the potentialities of movement that music can offer, namely musical affordances⁴ (e.g. Godøy et al., 2006; Godøy, 2009, 2010; Godøy & Leman, 2010).

⁴ For reference purposes, a few other studies can be cited in the musical affordances literature. However, these studies are not directly connected to our experiment. Overall, all these studies or reviews agree on the fact that music affords movement. See Reybrouck, 2005; López Cano, 2006; Menin, & Schiavio, 2012; Windsor, & de Bézenac, 2012; Altavilla, Caramiaux, & Tanaka, 2013.

As Eric Clarke (2005) suggested, in the presence of music, our auditory system might resonate with inherent features inside it. Clarke's view on musical affordance is that changing features in music afford movement. In the natural world, variations in a sound are a synonym of movement. For example, hearing an ambulance passing by with its siren blaring has a distinctive pitch and dynamic acoustic signature (i.e. the Doppler Effect). Similarly, he suggested that music and movements are related because music production requires movements. In that sense, listening to music would be evocative of movement, or rather percepts of movement. In Clarke's view, the percepts are related to movements performed by others (e.g. musicians), external to the individual. He then suggests that the perception of movement resonates with our own actions through mirror neurons (see Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996; Rizzolatti, & Craighero, 2004). Alternatively, Todd (1999) suggested that these percepts of motion could be illusions of self-motion created by the direct stimulation through sound of the saccule, the vestibular organ responsible for the sense of self-motion. Altogether, these two accounts agree on the fact that the perception of music is constituted by percepts of bodily motion.

In accordance with Clarke's (2005) view, a few studies have tried to explore music-induced movements to uncover which features are relevant for bodily involvement in music. Godøy (2009) and Leman (2008) suggested that the musical structure itself could be the support on which people develop their movement in response to music. In that sense, Naveda and Leman (2010) studied the spatio-temporal representations of dance movements in expert dancers. They showed that movements were tuned to periodicities equivalent to two beats. More precisely, they suggest that dancing is a goal-directed activity. Dancers tend to synchronize their movement trajectories with points in time and space according to the beat. Beats would then be auditory temporal cues to perform a certain movement in space. Similarly, Toiviainen, Luck and Thompson (2010) demonstrated that untrained dancers were also tuned to periodicities of two beats. Their results also revealed that different rhythmic levels were hierarchically represented through gestures. For example, a certain type of movements was associated with the metrical level (i.e. every four beats) while other movements were performed in accordance with every beat. A third experiment by Burger, Thompson, Luck, Saarikallio and Toiviainen (2013) also showed that participants were sensitive to different rhythmical features (e.g. pulse clarity). It is noteworthy that the term "musical affordances" is never mentioned in these previous studies. However, we believe that music-induced gestures are the expression of such musical affordances, especially in novices. Therefore, these experiments tend to indicate that rhythm and particularly its fundamental unit, the beat, could be the basis of musical affordances, as suggested by Godøy (2009) and Leman (2008). These observations are also in line with Janata et al. (2012), suggesting that listeners are bodily involved in music through synchronization with the beat, ultimately putting them "in the groove".

According to theories on affordances, these associations between movement and sound are based on ecological knowledge gathered through experience (Godøy, 2010); affordances arise from ecological knowledge of sound-gesture relationships. These experiences consist of systematic and repeated perception as well as corporeal interaction

with music occurrences and result in generalized schemata for sound perception (Godøy et al., 2006). These schemata can be used to understand familiar and unfamiliar sounds, just as familiarity with the musical piece did not have an impact on how participants felt “in the groove” (Janata et al., 2012). As López Cano (2006) suggested, musical affordances are functional meanings of music (see also: Naveda & Leman, 2008, 2009). For example, Leman, Desmet, Styns, van Noorden and Moelants (2009) asked participants that were unfamiliar with the Chinese instrument *guqin* to move their arm along with a *guqin* instrumental performance. They found that participants’ velocity patterns while moving their arm were correlated with the performer’s movements. This suggests that listeners and performers share a common knowledge on how to physically render certain features of the music. This is particularly interesting as even though participants did not know the *guqin*, they were able to perform movements that matched the performer’s expressiveness. Another experiment by Godøy et al. (2006) where participants were asked to pretend playing the piano (i.e. playing an “air instrument”) while listening to a piano performance showed similar results. Movements relative to synchrony with the beat and the rendering of the dynamic of the musical piece were relatively good for novices and experts alike. This suggests that mimicry of sound-producing actions is spontaneous and requires little or no special training (Haga, 2008). In another experiment, Mitchell and Gallaher (2001) have examined the relationship between a dance movement and its musical counterpart. They were interested in the capacity of participants to detect a match between a piece of music and a dance intended to express it. They showed that participants were mostly accurate to detect which dance matched each track they were presented, suggesting that dance and music could be easily associated and physically understood even without previous knowledge of one or the other. Such experiments thus rely on ecological knowledge of the relation between music and gestures (i.e. musical affordances) that are used in a motor or perceptual task.

The formation of this ecological knowledge has been the subject of recent studies in music cognition and especially through the lens of embodied music cognition (Leman, 2008; Godøy & Leman, 2010). The embodied music cognition approach relies on the general assumption that cognition is grounded in sensorimotor processes and that knowledge always include sensorimotor simulations of both motor and perceptual information (see Barsalou, 2008; Glenberg, 2010; Shapiro, 2011). Embodied cognition emphasizes the role of imitation and internal simulation of movements in order to understand movements in general. These sensorimotor simulations in the brain have first been discovered in the visuomotor domain (Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti, & Craighero, 2004). Later, the same sensorimotor interactions were found in the audio-motor domain, where listening to the typical sound produced by a learned action activated the premotor areas (e.g. Kohler et al., 2002). Regarding music, embodied music cognition is thus based on the idea that movements related to music emerge on the basis of auditory-motor coupling in the brain and learned sound-movement associations (Leman, 2008; Godøy & Leman, 2010). For example, Haueisen and Knosche (2001) studied motion patterns in the brain during music listening. They found activation in the motor cortex when listening to a well-trained piece of music in expert pianists (see also Bangert et al. 2006; Lahav, Saltzman, & Schlaug, 2007). These findings support the idea that the motor and auditory components of a musical piece are both encoded

in the brain through sensorimotor integration and can interact with each other. In other words, perceiving one of the two components would immediately activate the other one as they both belong to the same multi-modal representation. This is also in accordance with the common coding theory of Prinz (1997) that states that actions and perception (i.e. perceptual consequences) are encoded and stored in a shared representation.

While the experiments reviewed earlier investigated the effect of perception on actions (i.e. perception guides action), it is only recently that the influence of action on perception has been studied. A few studies have studied the impact of movement on musical or rhythmic representations (see Maes, Leman, Palmer and Wanderley, 2014 for a review). Repp and Knoblich (2007), for example, showed that pianists are influenced by the way they move their hand while listening to an ambiguous tone which pitch could either be heard as rising or falling. Participants either moved their hand from left to right or right to left on a muted keyboard while listening to this ambiguous tone. When pianists moved from left to right (i.e. associated with playing a rising tone on a piano), the pitch was reported as rising and the opposite was reported for the right-left movements. The authors explained these results in terms of representations of the perceptual consequences of the direction of hand movements on a piano determining what the pianist heard. In a similar fashion, Phillips-Silver & Trainor (2005, 2007) reported an influence of movement on the perception of ambiguous rhythms. The authors asked participants to bounce by bending their knees to interpret the rhythm either as a march or as a waltz. Results showed that in a recognition task, participants that had bounced according to a waltz reported hearing a waltz-like rhythm and participants that bounced to a march reported hearing a march. This is particularly interesting because all participants effectively listened to the same rhythm. The accentuations that were missing inside the excerpt were thus given by motion, most likely through vestibular activation, biasing the construction of the representation of the musical stimuli toward a metrical interpretation. More recently, Maes and Leman (2013) showed that children's perception of a song's expressiveness can be modified in accordance with the expressive character of the dance choreography performed to the music (i.e. either sad or happy). Children that performed a "happy dance" were more likely to report the song as happier than children who performed the "sad dance" on the same track. The choreographies' meaning was conveyed to the song by merging movements and perception inside a shared representation.

Apart from modifying the perception of specific features inside a particular track (e.g. tone, rhythm or valence), the interaction between movements and perception has also been studied in episodic memory. Most studies regarding episodic memory of music have focused on recognition because asking participants to reproduce music (i.e. recalling) requires special skills. In that sense, Brown and Palmer (2012) investigated audio-motor learning (i.e. being physically involved in the production of music and listening to it) on music recognition. They asked participants either to play new songs on a piano or to simply listen to some other new songs. Results showed that learning a new musical piece by playing it on the piano compared to only listening to it facilitated its later recognition. Interestingly, they showed that for this effect to arise, participants had to hear their own performance, suggesting that only a strong link between movements and sound would help participants. When presented with another

recording of the same song while playing it themselves, participants did not benefit from audio-motor learning. This suggested that producing music and hearing the related perceptual consequences strengthened the memory trace in episodic memory. In other words, linking movements to perception into a common audio-motor representation helped the later recognition of the produced song.

Regarding the auditory representations of music alone, Snyder (2000) suggested that memory for music is divided into three stages: feature extraction, short term memory and long term memory. The main idea behind the first stage is that the second stage of memory is limited in size and duration. Therefore, before any cognitive process taking place, the complexity of the information that goes through the system must be reduced. The musical stream is thus simplified by perceptual categorization and grouping of similar events. This grouping reflects the natural tendency of the human nervous system to segment acoustical information whose components seem related, ultimately forming relevant percepts (i.e. chunks). These percepts are about 3 to 5 seconds long, corresponding to relevant musical features such as beats, rhythms or melodies. At this point, this extraction can then evoke or activate previous similar experiences in long term memory (LTM). The activated LTM forms a context for the current experience in the form of expectations. These expectations can influence the direction of the attentional focus on certain parts on the music. Snyder (2000) further speculates that information that reaches higher states of activation can persist inside short term memory. If this information is rehearsed or repeated enough, it greatly increases the chances of it being integrated in LTM. The short term memory also serves the purpose of detecting if repetitive patterns are present in the musical stream. In other words, music that is repetitive and respects a hierarchical organization is more likely to be remembered than music that lacks this characteristic. For that reason, Snyder (2000) suggested that memory for music is linked to the structure of music itself and its perception. This memory process also accounts for music recognition as feature extraction is directly related to previous experiences, forming expectations and focusing attention on relevant features. In other words, hearing parts of a song (i.e. features) activates consistent memory traces stored in long term memory to help processing it.

In line with this set of studies and studies on musical affordances, we wanted to know if associating sound and movement in a perception task would have an effect on episodic memory. Therefore, the question we wanted to address in this paper is whether dancing on a musical piece (or rather moving along to it) could enhance memory for it in a recognition task. The main hypothesis put forward here is that asking participants to move according to the music would put them “in the groove”, increasing their self-involvement, enjoyment and sensorimotor coupling with music (Janata et al. 2012). Also, asking participants to embody musical features could enhance their perception, as suggested by Su and Pöppel (2012) and help them being integrated in long term memory (Snyder, 2000). This would ultimately help creating a multi-modal representation of the musical piece. This multimodal representation would then be accessed through mental simulation in the recognition phase, allowing the participant to distinguish between musical pieces that were associated with movement and the others (i.e. distractors). To test this hypothesis, we conducted an experiment where groups of

participants either had to be physically involved while listening to music or had to listen without moving. We asked participants to either dance to the music or to play some “air instruments” (Godøy et al., 2006) according to what they heard.

In a recognition task, we can also vary the similarity between the studied music and the test music. For instance, changing the timbre and groove but keeping the piece identical. This permits the testing of a second hypothesis that changes in musical features between targets and distractors in the recognition task would specifically help participants’ recognition in their task. The reasoning behind this hypothesis is that participants that move along with the music would differentiate targets from distractors more easily if they have different groove (i.e. implying different movements). Moreover, participants that play air instruments would differentiate targets from distractors more easily if they are played with different instruments. Listeners would also benefit from this difference but to a lesser extent as they would not be embodying these features. These two features seem to be relevant as previous studies have shown that timbre and tempo are specifically encoded for a particular track in memory. Halpern and Müllensiefen (2008) have for example demonstrated that tracks that changed in tempo (i.e. faster or slower) or timbre (i.e. played with a different instrument) between encoding and recognition were more likely to be missed (i.e. answering “no” when “yes” is expected) than tracks that didn’t change. Halpern and Müllensiefen (2008) thus suggested that musical pieces are encoded with their respective timbre and tempo. Furthermore, Trainor, Wu and Tsang (2004) have shown that infants are able to distinguish between two identical songs played at different tempi or with different instruments. Burger, Thompson, Luck and Saarikallio (2013) have also shown that rhythm and timbre-related musical features influence music-induced movements. In other words, moving along to music with different rhythmical and timbre-related features would result in qualitatively different movements. In a recognition task, the distinction between targets and distractors could therefore be reinforced using tracks with different tempi or timbre. To test this hypothesis, we selected items by pairs of excerpts that incorporate either a change of groove (different dynamic) or a change of instrumentation (different instruments) between them. Each individual pair of excerpts was chosen inside a single track to maintain a certain similarity between excerpts.

2. Method

2.1 Participants

A total of 78 participants participated in this study (69 women, nine men, $M = 20$ years old, $SD = 1.9$). The participants were all from the University of Burgundy in Dijon and participated in the experiment in exchange for experimental credits for their courses. Among the 78 participants, 17 of them were expert dancers (at least three years of practice). Musical experience and dance experience were also collected for each participant. Musical training ranged from 0 to 15 with an average of $2.00 (\pm 3.3)$ years of experience. On the one hand, in non-expert dancers, dancing frequency ranged from “I never dance” to “I go dancing twice a week for two hours”. Expert dancers’ experience, on the other hand, ranged from 3 to 16 years of weekly practice, with an average of $8.41 (\pm 4.27)$ years of practice.

2.2 Material

We first selected a set of 72 tracks from the Jazz-Rock-Fusion genre that integrated at least two passages longer than 30 seconds without lyrics. These tracks were then narrowed down to 40 to consist of 20 tracks that integrated a change in Groove and 20 tracks that integrated a change in Instrumentation within the track. The basic idea behind these two types of changes is that moving along to the track at two different points in time would result in qualitatively different movements. In other words, an excerpt at one point would elicit one type of movement while another excerpt inside the same track at a different point in time would elicit another type of movement. A change in Groove corresponds to a change of dynamics (e.g. played harder, slower/faster tempo, etc.) inside the track but played with the same instruments. For example, one excerpt can be more percussive and aggressive than the other excerpt. Two excerpts that differ in Instrumentation have the same dynamic but are played with different instruments. For example, at one point in the song, one instrument is clearly more salient than the others while at another point in the song instruments are balanced. The introduction of a guitar solo over the other instruments and the inclusion of a new instrument are both good examples of changes in Instrumentation. In each track we thus selected a pair of 30s excerpts that represented either a change in Groove or a change in Instrumentation; the within-subject variable “Distractor type”.

The 40 pairs of excerpts were then assessed by ten participants in a pretest study. Participants were explained what to look for in each pair and assessed the saliency of the two type of changes on a scale from 1 to 10. First, pairs that scored high on both scales were dismissed. We then chose the ten pairs with the greatest change in Groove and the ten pairs with the greatest change in Instrumentation. In total, the whole stimuli set consisted of 20 pairs of excerpts with an equal number of pairs representing each type of change (10). The complete track list and locations of each excerpt within a track is reported in the Appendix section.

2.3 Procedure

The experiment was described to the participants as a study involving the creation of a set of enjoyable and stimulating musical stimuli. Non-expert participants were randomly assigned to one of the four encoding condition. A group of expert dancers was recruited separately and assigned to the Dancing-expert condition. The experiment consisted of an encoding phase and a recognition phase. During the encoding phase, participants randomly listened to one excerpt of each pair for a total of 20 excerpts.

To assess the beneficial effect of moving along to music, a total of five between-subject conditions were created. In the “Listening” condition, participants listened to the songs while seating on a chair and remained seated throughout the experiment. In three “Dancing” conditions, participants were asked to dance to, or rather to move along to the music. In the Dancing-standing and Dancing-expert dance condition, participants were standing during the recognition task whereas participants were seated during the recognition task in the Dancing-sitting condition. The purpose of asking participants to remain standing

during the recognition task was to ensure optimal access to the motor information by matching their encoding posture to their recognition posture. In that sense, we should expect better performances from the Dancing-standing and -expert conditions than the -sitting condition. In a last “Mime” condition, participants were told to mimic playing the music they were hearing (e.g. air instruments) and were also standing during the recognition task. Participants were instructed to choose one or more instruments to imitate while listening to the excerpt. This instrument always had to be the most “salient” and it could be switched to an easier instrument to imitate anytime in the excerpt.

At the end of each excerpt, two questions were asked. Participants were asked to rate each extract on a scale ranging from 1 to 6 for *agreeableness* (Listen condition), *dance-ability* (all Dancing conditions) or *imitate-ability* (Mime condition). The second question was meant to determine whether the extract was known to participants.

To ensure that participants danced, their feet were filmed from outside the soundproof room in which the experiment was taking place. Participants were told about its presence and the fact that experimenters would know if they weren’t dancing. To minimize the participants’ unease and self-consciousness during the Mime condition, it was decided not to film the upper body movements. The experimenter emphasized the role of correct air instrument playing for an accurate evaluation of the imitate-ability instead.

Five minutes after encoding, participants were given a recognition task. Participants were not aware of an upcoming recognition task until they were explained the second phase of the experiment. All of the 40 musical excerpts (targets and distractors) were randomly presented to the participants and their task was to determine, for each excerpt, if it had been presented in the encoding phase. The excerpts were shortened to the middle 10-second section of each excerpt to minimize testing time.

After the experiment, participants were asked to fill in a questionnaire about their musical and dancing experience.

3. Results

A total of 78 participants participated in the experiment: 13 in the Dancing-sitting condition, 15 in the Dancing-standing condition, 16 in the Listening condition, 17 in the Mime condition and 17 in the Dancing-expert condition.

Our main goal was to assess whether participants would benefit from moving along to the musical material. The d' (sensitivity) index was calculated by subtracting the standardized (z-score) false positive rate (FPR) from the standardized hit rate for each participant. The hit rate corresponds to the percentage of correct answers when the expected answer was “yes”. The false positive rate corresponds to the percentage of wrong answers when the expected answer was “no”. Sensitivity indices ranged from 0.126 to 2.12 with an average of 1.06 (± 0.48).

A 5 between-factor (*Listening, Dancing-sitting, Dancing-standing, Dancing-expert, Mime*) x 2 within-factor (*Groove, Instrumentation*) repeated measures analysis of variance (ANOVA) was performed. Analysis revealed a main effect of condition ($F(4,73)=3.7780$, $p=.007$) where Listeners performed better than all other conditions. No differences were found between the four other conditions. Our second goal was to assess whether participants would specifically benefit from changes in musical affordances according to their task. The previous repeated-measure ANOVA showed no effect of distractor type ($F(1,73)= 1.9217$, $p=.17$) and no significant interaction was found either ($F(4,73)=0.6421$, $p=.63$). Mean d' scores for each condition depending on the distractor type are shown in Figure 1.

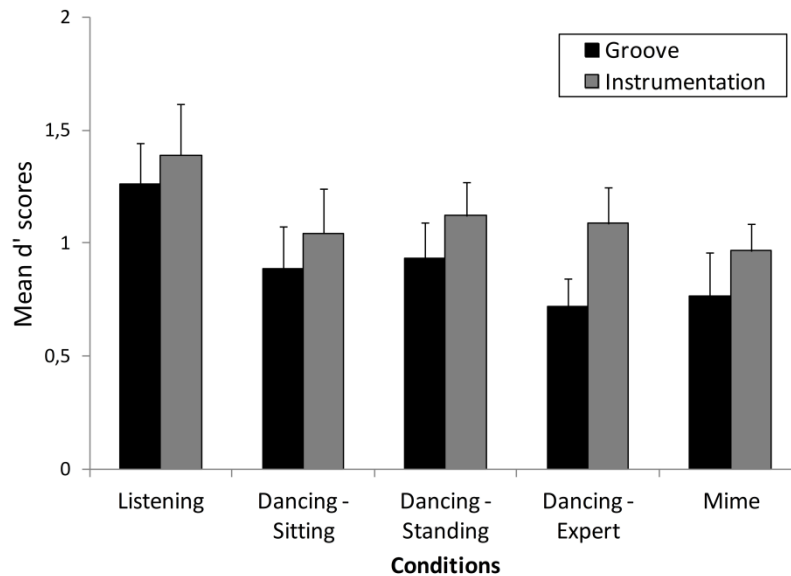


Figure 1. Mean d' scores for each condition and each distractor type. Error bars represent the standard error.

Nevertheless, a closer look at the data revealed that false positive rates (FPR) were affected by the distractor type. Hit rates were calculated for each condition but not for each distractor type because they do not give information about our hypothesis (i.e. changes are only relevant for distractors). False positive rates were calculated for each condition and for each distractor type. A 5 between-factor (*Listening, Dancing-sitting, Dancing-standing, Dancing-expert, Mime*) x 2 within-factor (*Groove, Instrumentation*) repeated measures analysis of variance (ANOVA) was thus performed on FPR. Analyses revealed no main effect of condition ($F(4,73)=1.7568$, $p=.14$). However, a main effect of distractor type was found ($F(1,73)=12.541$, $p<.001$) with Instrumentation changes leading to greater FPR (30%) than changes in groove (22.5%). No interaction was found. These results suggest that participants were more likely to confuse two excerpts when their groove was similar but played with different instruments than the contrary. False positives rates (FPR) for each distractor type and hit rates are shown in Figure 2.

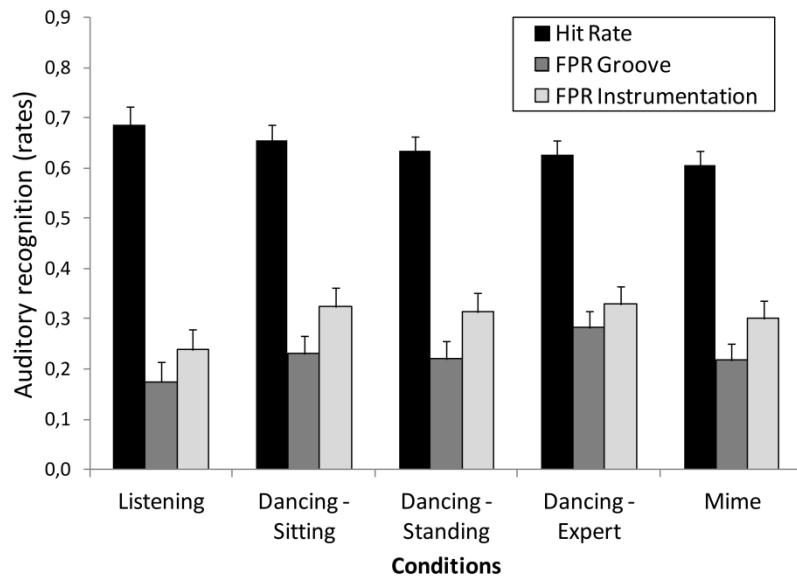


Figure 2. Hit Rates and False Positive Rates (FPR) for each condition and distractor type. Hit Rates were not calculated for each distractor type because it was not relevant to our hypothesis. Error bars represent the standard error.

Further analyses were performed. We first wanted to know if subjective stimuli ratings had an impact on performance. Namely, are stimuli that are rated higher in agreeableness, dance-ability or imitate-ability remembered better? Hence, we performed correlation analyses between ratings of each item and performance (Hit rate and False Positive rate). On average, participants in the Listening task rated the stimuli as 3.83 (± 0.56) out of 6 on the agreeable scale. However, there was no correlation with stimuli ratings and associated performance. In the tasks that involved dancing, the average dance-ability ratings for all stimuli were as follows: 3.04 (± 0.73) in the Dancing-sitting condition, 3.19 (± 0.72) in the Dancing-standing condition and 3.54 (± 0.66) in the Dancing-expert condition. Within each individual task, no correlation between rating and performances was found. However, average ratings were significantly different between tasks. Expert dancers evaluated stimuli as significantly easier to dance to than in the other two dancing conditions (p-values: Dancing-expert/Dancing-sitting $p = .002$, Dancing-expert/Dancing-standing $p < .001$). There was no difference in ratings between the Dancing and Standing task. Considering that the only difference between these tasks is found in the recognition phase, this is not surprising. In the Mime task, participants rated stimuli as 3.89 (± 0.66) out of 6 on the imitate-ability scale. However, there was no correlation between ratings and performances either.

Finally, we wanted to know if performance was related to the amount of experience in either dance or instrumental music. A correlation analysis was thus performed between years of practice in music and in dance training (in experts) and d' scores and revealed no significant correlation.

4. Discussion

The present study assessed whether moving along to a musical piece would influence its later recognition. We expected higher recognition for participants who danced and played air instruments along to the music compared to participants who only listened without moving. Expert dancers were also expected to recognize more items than the other groups. However, results showed that Listeners performed the best out of all conditions. No difference between conditions that involved moving along to music was found.

We aligned our predictions within the general assumption of embodied cognition and the perception-action loop, taking into account the ideas of musical affordances. The key idea is that representations of actions and perceptions interact with each other and that musical affordances help us build meaningful motor representations of music which should be observable as subsequent memory effects. The interaction can either be positive, merging the representations together (e.g. Maes & Leman, 2013) or negative, causing representations to interfere with each other. While the literature on music embodiment usually suggests that movements can interact positively with the perception of a musical piece, previous experiments have typically used ambiguous musical stimuli (e.g. Phillips-Silver, & Trainor, 2005, 2007; Repp & Knoblich, 2007; Maes & Leman, 2013). According to our results and explanation, we are closer to a negative effect (also known as repulsion, Schütz-Bosbach & Prinz, 2007) in that movements reduced memory performance relative to a group of listeners.

One way of understanding our results is to consider that participants were experiencing a dual-task situation when moving along to the music (see Pashler, 1994). They had to extract relevant features in the music (e.g. rhythms, beats, instruments) and produce movement accordingly while trying to encode the musical piece. Participants were thus inclined to divide their attention⁵ and focus more on moving accordingly to the beat or trying to imitate an instrument than encoding the musical pieces. By contrast, participants in the listening tasks only had to encode the musical pieces. However, given that experts should possess much more ecological knowledge on how to move along to music, they should not have had difficulties in doing so. This was reflected in the results; experts rated excerpts as more “dance-able” than other participants. Hence, this explanation in terms of dual-tasking does not seem to be satisfactory since expert dancers did not perform differently from others and we might expect them to find dancing to music a rather automatic, non-demanding condition.

Another explanation could be that participants in the listening condition created more complex representations, leading to better recognition than participants in the Dancing and Mime conditions. We hypothesized that dancing and playing air instruments would increase the involvement in the task (i.e. getting into the groove) and help creating an auditory-motor representation of each excerpt. These tasks would then ultimately allow excerpts to be more

⁵ There is a multitude of ways in which this divided attention account may manifest itself. For instance, it is not impossible that participants felt self-conscious whilst dancing, and this may have lead to the detriment in performance. However, it is not clear why the expert dancers who presumably are not self conscious showed a negative effect.

salient in memory and to be accessed more easily in a recognition task through cueing. When participants were told to interact with music in a motor way, Godøy et al. (2006) suggested that listeners would search for affordable musical features inside the music (i.e. musical affordances). The action potentialities that these features afford would be based on ecological knowledge that is gathered through experience. In our case, participants moved along to music by searching for instrumental, rhythmic and dynamical features that could serve as musical affordances. As soon as the participants began to move along to music, actions were tuned to perception; participants' movements were adapted to the songs (i.e. synchronized), in a seemingly effortless way (according to imitate-ability and dance-ability ratings) but participants only had to focus on perceptual information (i.e. dynamic, instruments and rhythm).

We argue that this kind of processing presumably reflects a rather shallow level of processing according to the fact that when listening to the music alone, performance is better (Craik, & Tulving, 1975). In that sense, participants in the tasks involving moving along to music did not process the music too deeply to perform the task and perhaps expert dancers listened even less carefully to the song than other participants. In the listening task, participants evaluated the excerpt according to consonance, familiarity, emotional content, their own musical preferences, beauty judgments and to some extent motor processes. Such conceptual and relational judgments may have encouraged deep processing which activates self concepts which are known to improve memory function (e.g. Self-reference effect, Symons, & Johnson, 1997). In contrast, in the dancing conditions, one acts on the here-and-now of the music as being somewhat external rather than internalizing it.

We are therefore arguing that participants in the two types of tasks did not process each excerpt the same way. Listeners processed the music deeply as a whole while dancers processed music as a repetition of beats and rhythms. This succession of beats was the support of their dancing movements. Mimickers processed music in a similar way, focusing on instrumental cues appearing in the musical stream. Furthermore, in the recognition phase, movers (i.e. dancers and mimickers) did not benefit from motor cues (i.e. remembering they danced on a particular excerpt) because they were not created in the first place. Movers only looked for relevant but shallow cues in the musical stream to stay in synchrony with the excerpt. Movers may have been more involved in the task but only “in the moment” while listeners used higher order processes to perform their task in the encoding phase. Movers were not suffering from the task being too difficult but rather from the task not requiring deep processing. In other words, movers reacted to the music while listeners thought about it more thoroughly.

Along with Toiviainen, et al. (2010) and Burget et al. (2013), we have used what they termed as “music-induced movements”. They suggested that these spontaneous movements are the embodiment of musical structures, starting from the beat as a fundamental unit. Although not mentioned in these experiments, we argue that music-induced movements are the expression of musical affordances. Naveda and Leman (2010) further demonstrated that expert dancers used what they called “spatio-temporal representations” of dance and music gestures when asked to move along to music. While these representations have been created

through practice and experience, they are generic enough to accommodate any musical piece inside the dancer's musical repertoire of expertise. In other words, these representations are sufficient to move along to any musical piece as long as rhythmical features can be extracted (Janata et al., 2012; Godøy et al., 2006). In our experiment, synchronizing with the beat or instruments was the most efficient strategy to accomplish the motor task. As a consequence, we could then argue that, in addition to participants only focusing on shallow features, music-induced movements were unspecific, merely accompanying the succession of beats inside each track. For this reason, no association between movements and music was created. In sum, participants tuned their movements to the rhythmical features of the tracks using unspecific movements that could accommodate any track. This "unspecific" explanation is in accordance with Brown and Palmer's (2012) experiment. They found that when participants did not hear their own performance (i.e. they heard a recording while playing), they did not benefit from audio-motor learning, suggesting that there must be a strong match between movements and music for such an effect to arise.

Compared to a perceptual task, Brown and Palmer's (2012) production task involved very specific motor associations. Perceptual consequences (i.e. sounds) of each note played on the piano were associated and combined inside a shared representation (see Prinz, 1997). In that sense, movements that are produced and what is heard in a music production task always match. In a perceptual task, however, produced movements are bound to be unrelated, especially for novices. One could thus argue that our results are against Leman's (2007) view that music can be given meaning through corporeal involvement in music, at least as measured by subsequent memory performance. As Maes and Leman (2013) suggested, music-related movements can nonetheless be shaped into specific, meaningful gestures by means of choreography. They showed that meaning (i.e. emotional valence) can be given by involving participants in a specific choreography, supposed to represent a distinct sad or happy emotion. This was achieved by imposing emotional meaning onto an ambiguous musical piece through dance. Accordingly, music was effectively given emotional meaning through corporeal involvement. In our experiment, meaning was also given to the excerpts by bodily means. However, this meaning was neither related to emotions nor semantics. Participants applied their knowledge of music-movement interactions to the music in order to move along to it. They performed movements that were corresponding to the rhythmical structure of music. In that sense, participants gave it a "corporeal" meaning, making sense of the task. To some extent, evaluating each excerpt also gave a corporeal meaning to their movements. Listeners gave a more semantic meaning to each excerpt by rating them in terms of agreeableness.

Our second hypothesis considered whether specific changes in musical affordances would benefit specific tasks. More precisely, we predicted that dancers would benefit from changes in groove and air instruments players would benefit from instrumental changes within a pair of target-distractor excerpts. We did not find such an interaction but rather a main effect of distractor type across all conditions. Interestingly, we found that changes in instrumentation led to more confusion. Participants were more likely to consider a new item as an old item (i.e. false positive) when targets and distractors had the same groove, played with different instruments. In the same way, participants were more likely to differentiate two

excerpts that had different grooves. Excerpts that were perceptually close regarding their groove were taken as more similar than excerpts with different grooves. This suggests that participants relied on groove to assess the similarity between two excerpts, making it a reliable feature to tell two excerpts apart.

In relation to the level of processing account and brain imagery studies, although it has not been directly tested in this experiment, our results suggest that music perception can be empirically focused on two different aspects (i.e. aesthetic or motor) depending on the task. As suggested by Niedenthal, Winkielman, Mondillon and Vermeulen (2009), internal simulations of the same material can differ depending on the required task. They showed that participants that were asked to determine whether a word was associated with an emotion covertly simulated the corresponding facial expression. Participants that had to determine whether the word was written in an upper- or lowercase did not manifest such covert facial simulation. This effect was attributed to internal simulations of the required answer for each task. Asking participants to focus on emotions led them to access an emotional concept in memory, therefore activating the related motor component of that emotion. We could thus argue that asking participants to judge a piece's "dance-ability" would result in motor-related brain activity while evaluating its pleasantness would not. However, brain imagery studies have demonstrated the involvement of motor and premotor brain areas in both aesthetic judgment and listening tasks alike (for a review see Zatorre, Chen & Penhune, 2007). For example, Kornysheva, von Cramon, Jacobsen and Schubotz (2010) found a premotor activity boost in the brain when participants listened to their preferred beat rate. Similarly, Kornysheva, von Anshelm-Schiffer and Schubotz (2011) showed that the inhibition of the ventral premotor cortex (vPMC) interfered with aesthetic judgments of beat rates. Similar results have been found in listening tasks that did not involve any particular cognitive assessment. For example, Wilson & Davey (2002) reported an increased corticospinal excitability of the ankle muscles during strongly rhythmic music listening (see Grahn & Brett, 2007 for an fMRI study). Likewise, Stupacher, Hove, Novembre, Schütz-Bosbach and Keller (2013) have shown that high-groove music engages the motor system in listeners. They documented greater motor-evoked potentials (MEP) in the hand and arm muscles during high-groove than in low-groove music listening. Interestingly, this greater motor excitability was only observed in musicians. Non musicians displayed the opposite pattern, suggesting a suppression of overt movement. Hence, in our listening condition, it is most likely that participants also simulated motor aspects of the music. For example, agreeableness assessment might have required motor processes in the brain in order to evaluate whether it would be pleasant or easy to dance to an excerpt. Furthermore, according to the task requirements, we can safely suggest that participants in the motor tasks also simulated motor aspects of the music in order to perform their task. The interesting question that remains is whether movers and listeners' internal brain simulations were comparable. Although we cannot answer this question with our current data, we can arguably expect a greater motor simulation (i.e. greater premotor activation) in movers than in listeners. Furthermore, we can also expect more premotor activation even when participants are only asked to determine how dance-able an excerpt is (i.e. without moving), compared to assessing its pleasantness or only listening to it. The attentional focus required for the task might thus play a role on internal

simulations in music processing. Further research is needed to examine this issue. Ultimately, these results would give support to the notion that music is inherently corporeally processed, which is the center idea put forward in theories on musical affordances.

To conclude, our results give support to the notion of musical affordances. This special type of affordances is suggested to be a general requirement for tasks involving movement induced by music. Our initial assumption was that participants would benefit from their ability to interact with music in their memory performance, in line with theories of embodiment, and in keeping with the idea that movements may help 'elaborate' on the music. In the end, however, those participants who were not involved in a motor task showed a better memory performance. These unexpected findings are readily explained in terms of level of processing, which is relevant to the notion of affordances. As Gibson suggested (1979), the actions of individuals are tuned to perception as soon as they choose to seize the opportunity of the affordance. Critically for our argument, Gibson stated that this process does not require elaborate processing of the material. We therefore suggest that in our experiment, participants synchronized with the beats and other surface features to perform the task, performing movements that were based mostly on perceptual cues. In line with Craik and Tulving's (1975) level of processing theory, recognition performances decreased as the processing became more perceptually based. In sum, the perceptually based shallow processing of musical material inherent in musical affordances led to poorer recognition performances in movers.

Further research is thus needed in order to set the boundary between a detrimental and a beneficial effect of music embodiment on memory. Future research should also examine the role of repetitions on audio-motor learning in a perceptual task. Brown and Palmer (2012) suggested that six repetitions of each excerpt allowed the beneficial effect of audio-motor learning to arise while three repetitions prevented it. In our experiment, a single learning episode for each excerpt might not have been enough for a perceptual task. Furthermore, in Brown and Palmer's (2012) experiment, when the matching between performance and sounds was intact, participants benefited from audio-motor learning. When the matching was altered, the effect disappeared, suggesting an important role of a close match between sound and movement. While musical affordances can give participants the ability to interact with music, they are generic by definition. As suggested by Janata et al. (2012) and Godøy et al. (2006), the action schemata that are related to music perception can be used in almost every musical situation, as long as rhythmical features can be extracted. For that reason, music-induced movements might not be the most appropriate approach to test explicit memory, as we tended to demonstrate. Future research should thus explore the possibility that assessing musical affordances without moving could be more beneficial than actually performing them. Any future research may also consider the role of moving to music both during encoding and during retrieval. Perhaps movement acts as a cue for the recognition of music only when the same affordances are activated for a second time. In sum, our ecological approach has the merit of being representative of how people interact with music in normal circumstances. When people are interacting with music in a nightclub, for example, they tend to spontaneously move along to music in different ways. We could argue that these people

should not later remember the songs they danced to any better. Most importantly, whilst movement may change how we process musical stimuli, our findings suggest that an improvement in later recognition of the music is not an inevitable consequence.

Deuxième étude: How does moving along to music influence item and source memory for music?

Peckel Mathieu ⁽¹⁾, Bigand Emmanuel ⁽¹⁾

(1) Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Bourgogne, Dijon, France.

Abstract

The present study addressed whether moving along to music can enhance the retention of musical excerpts (item memory) and the contextual information associated with their encoding (source memory). According to musical affordances accounts, listeners should be able to move along to music. Embodied musical cognition accounts further suggest that the motor components associated with music should act as a retrieval cue. We thus made the assumption that moving along to music would result in the creation of a richer and more complex representation when participants move along to music. Participants were either requested to move along to music (Dancing) or to listen to the musical excerpts (Listening) without moving. Results failed to show a difference between the two tasks regarding both the item and source recognition performances. However, a post-test revealed that participants were sensitive to a perceived difference in movements evoked by a target-distractor excerpt pair. Remarkably, this correlation was found in both tasks, suggesting that participants processed music in a motoric fashion indiscriminately. We argue that this automatic motor processing of music could explain the lack of difference between moving along and listening to music. Our results are discussed in terms of the coupling of perception and action, embodied music cognition and musical affordances.

Keywords: music perception, dance, episodic memory, musical affordances, groove, perception-action coupling

1. Introduction

The ability to consciously retrieve past events or experiences in episodic memory (Tulving, 1972) is usually associated with the quality of the encoding phase (Prince, Daselaar, & Cabeza, 2005; Hertzog et al. 2010). Its quality can be improved depending on the contextual information associated with the item. For example, richer contexts help creating multiple retrieval cues, facilitating the access to the target item in episodic memory (Hupbach, Hardt, Gmze, & Nadel, 2008). For example, Kensinger and Corkin (2003) have shown that emotional words are remembered better than neutral words (see Hamann, 2001 for a review). Due to its rich emotional content (Blood, & Zatorre, 2001; Salimpoor et al., 2013), music has also been studied as a mean to improve the encoding of verbal material. In that sense, emotional music can provide additional cues which can be used to recall material in memory (e.g. Eschrich, Münte, & Altenmüller, 2008). Results regarding the impact of a “musical encoding” on memory usually tend to show that it helps the recollection of verbal material in a young (e.g. Ferreri, Aucouturier, Muthalib, Bigand, & Bugaiska, 2013) and elderly adult population (e.g. Ferreri et al. 2014). Research has also found similar results in a clinical population of demented patients (e.g. Thompson, Moulin, Hayre, & Jones, 2005), stroke patients (Särkämö et al., 2008) and Alzheimer’s patients (Simmons-Stern et al., 2010).

The effect of contextual information on episodic memory has usually been studied by manipulating perceptual (e.g. music, see Ferreri et al. 2013), emotional (e.g. Kensinger, & Corkin, 2003) or spatial (e.g. Tulving, 2002) information during the encoding phase. Another factor that has been given less attention until recently is the motor contextual information associated with the encoding. One line of research, for example, has documented that producing words vocally can improve later recognition of these words (i.e. *Production Effect*, see MacLeod, 2011; MacLeod, Gopie, Neary, & Ozubko, 2010; Ozubko, & MacLeod, 2010). Ozubko and MacLeod (2010) suggested that vocally producing the words make them more distinctive during their encoding compared to words that were only read silently. In a similar fashion, Senkfor, Van Pettern and Kutas (2008) have shown that physically performing an action (i.e. enactive encoding or *enactment*) associated with an action-phrase (e.g. “fold the napkin”) improves its retrieval compared to a verbal encoding only. In this case, it would also be the motor information that is produced during the encoding phase that would act as a retrieval cue during test. These effects are closely related to the sensorimotor integration accounts of event coding proposed by Prinz (1997) and Hommel et al. (2001). These suggest that the planning or the execution of an action and the perception of its related sensory consequences are encoded in a shared representation in the brain. As a result, whenever one of the two components is activated, both motor and sensory information are accessed and act as retrieval cues. Altogether, this suggests that associating movement to the to-be-remembered material might also enhance its encoding and subsequent retrieval in episodic memory.

Due to its close relationship with movement (Clarke, 2005; Zatorre et al., 2007), music has been recently studied to further the understanding of the relationship between action and perception. This interaction has been the focus of studies on the embodied nature of music cognition (Leman, 2008). Embodied music cognition relies on the general assumption that

bodily states, perceptual systems and actions underlie information processing (see Wilson, 2002; Barsalou, 2008; Shapiro, 2010) and applies it to music cognition (Leman, 2008; Godøy, & Leman, 2010). This approach emphasizes the fact that music cognition relies on the idea that movements related to music emerge on the basis of auditory-motor coupling in the brain and learned sound-movement associations (Leman, 2008). For example, Haueisen and Knosche (2001) studied motion patterns in the brain during music listening. They found activation in the motor cortex when listening to a well-trained piece of music in expert pianists (see also Bangert et al. 2006; Lahav et al., 2007). These findings support the idea that the motor and auditory components of a musical piece are both coded in the brain through sensorimotor integration (Hommel et al., 2001) and can interact with each other. In that sense, Brown and Palmer (2012) investigated audio-motor learning (i.e. being physically involved in the production of music and listening to it) on music recognition. They asked participants either to play new songs on a piano or to simply listen to some other new songs. Results showed that learning a new musical piece by playing it on the piano compared to only listening to it facilitated its later recognition. Interestingly, they showed that for this effect to arise, participants had to hear their own performance, suggesting that only a strong link between movements and sound would help participants. When presented with another recording of the same song while playing it themselves, participants did not benefit from audio-motor learning. This suggested that producing music and hearing the related perceptual consequences strengthened the memory trace in episodic memory. In other words, linking movements to perception into a common audio-motor representation helped the later recognition of the produced song.

Apart from this highly specialized instrumental musical knowledge, the link between music perception and movements was also examined in novices using more ecological and spontaneous movements. For example, Phillips-Silver & Trainor (2005, 2007) reported an influence of movement on the perception of ambiguous rhythms. The authors asked participants to bounce by bending their knees to interpret the rhythm either as a march or as a waltz. Results showed that in a recognition task, participants that had bounced according to a waltz reported hearing a waltz-like rhythm and participants that bounced to a march reported hearing a march. This is particularly interesting because all participants effectively listened to the same rhythm. The accentuations that were missing inside the excerpt were thus given by motion, most likely through vestibular activation, biasing the construction of the representation of the musical stimuli toward a metrical interpretation. More recently, Maes and Leman (2013) showed that children's perception of a song's expressiveness can be modified in accordance with the expressive character of the dance choreography performed to the music (i.e. either sad or happy). Children that performed a "happy dance" were more likely to report the song as happier than children who performed the "sad dance" on the same track. The choreographies' meaning was conveyed to the song by merging movements and perception inside a shared representation.

Moving along to music is a common way through which people interact with music (Keller, & Rieger, 2009) and would suggest that listeners can access an inherent motor component associated with music. Should it be through head bobbing, finger or foot tapping,

swaying or more elaborate movements, the tendency of people to engage physically with music seems to have an automatic and irresistible quality to it (Janata et al., 2012). According to Godøy (Godøy et al., 2006; Godøy, 2009, 2010), this audio-motor interaction in music can be understood within the framework of musical affordances, a term taken from the ecological approach of visual perception proposed by Gibson (1979). In a sense, musical affordances could be seen as the action potentialities that music can offer (Godøy, 2009, 2010; Godøy & Leman, 2010). Hence, spontaneous gestures performed in response to music (i.e. music-induced movements) might be the expression of these affordances inside of the musical material, especially in novices. Mitchell and Gallaher (2001) examined the relationship between dance movements and their musical counterpart. They were interested in the ability of participants to detect a match between a piece of music and a dance intended to express it. They showed that participants were mostly accurate to detect which dance matched each track they were presented, suggesting that dance and music could be easily associated and physically understood even without previous knowledge of one or the other. Toiviainen, Luck and Thompson (2010) were interested in examining these music-induced movements and demonstrated that untrained dancers were mostly expressing the same movements for the same songs. More precisely, they found consistencies in how participants rendered different metrical levels using different body parts and movements. Recently, Burger et al. (2013) also showed that participants' movements in response to music were sensitive to different rhythmical features (e.g. pulse clarity).

According to theories on musical affordances, these associations between movement and sound are based on ecological knowledge gathered through experience (Godøy, 2010); affordances arise from ecological knowledge of sound-gesture relationships. These experiences consist of systematic and repeated perception as well as corporeal interaction with music occurrences and result in generalized schemata for sound perception (Godøy et al., 2006a, 2006b). These schemata can be used to understand familiar and unfamiliar sounds. For example, Leman et al. (2009) asked participants that were unfamiliar with the Chinese instrument *guqin* to move their arm along with a *guqin* instrumental performance. They found that participants' movements were similar to those performed by the *guqin* instrumentalist. Another experiment by Godøy et al. (2006) where participants were asked to pretend playing the piano (i.e. playing an "air instrument") while listening to a piano performance showed comparable results. Movements relative to synchrony with the beat and the rendering of the dynamic of the musical piece were relatively good for novices and experts alike. This suggests that mimicry of sound-producing actions is spontaneous and requires little or no special training (Haga, 2008). This further suggests that listeners and performers share a common knowledge on how to physically render certain features of the music. In line with Clarke's (2005) view on musical affordances, these results suggest that the perception of music is also constituted by percepts of bodily motion. These percepts of movement would then resonate with our own actions through mirror neurons (see Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti, & Craighero, 2004) and result in actual motion.

The idea that music naturally induces movements that might be encoded in a shared representation is thus particularly appealing if one wish to study memory for music. Whereas

Brown and Palmer (2012) studied the impact of auditory-motor associations in music production, Peckel and Bigand (in press)⁶ have examined how the spontaneous music-induced movements influenced the recognition of new musical pieces. They asked groups of participants to either move along to music in various ways while listening or to listen to the pieces without moving. They showed that participants that did not move recognized the musical pieces better than participants that moved. Peckel and Bigand (in press) suggested that it was because participants that moved along to music did not process music as deep as participants that did not move. In the present study, we wanted to further address this by asking participants to focus on the motor contextual information in a within-subject design. As suggested by lines of research on the impact of motor information during encoding (e.g. production and enactment effect), it was the distinction between enacted and heard/read material that was critical. In that sense, asking participants to either move along to music or to stay still while listening would increase this distinctiveness between excerpts in the encoding phase. The within-subject design should further enhance the distinction between excerpts that were associated with movements and those which were not. Subsequently, the excerpts that were associated with movements would be better recognized due to their multi-modal characteristic in memory. The richer context (moving along to music) would act as a retrieval cue in the test phase. This distinctiveness should also help participants to recognize in which context the learned excerpts were encoded (standing still or moving). In sum, the distinctiveness between excerpts associated with movements and the others should improve item and source recognition for items that were associated with movement.

Interestingly, Peckel and Bigand (in press) also found that participants were sensitive to differences in affordances between excerpts inside a target-distractor pair. Namely, when excerpts differed in terms of “groove”, participants were more likely to correctly reject distractors as such in a recognition task. In line with studies on the musical groove, we tested the idea that this difference in groove was related to a difference in how excerpts induced movements in listeners. Hence, excerpts that induce very different movements should be more likely differentiated and correctly identified as target or distractor. In order to test for this second hypothesis, we conducted a post-test where participants rated the extent of which pairs of excerpts induced different movements.

2. Method

2.1 Participants

A total of 35 participants participated in this study with 32 women and 3 men (average age: 20.7 ± 3.4). The participants were all from the University of Burgundy in Dijon and participated in the experiment in exchange for experimental credits for their courses. Musical experience and dance experience were collected for each participant. Musical training ranged from 0 to 20 with an average of $2.4 (\pm 4.5)$ years of experience. Dancing experience ranged from 0 to 16 with an average of $4.0 (\pm 4.1)$ hours of dancing per month.

⁶ Cette référence est relative à l'Etude 1 de la thèse.

2.2 Material

The selection of musical the material was based on the material used in a previous experiment by Peckel and Bigand (in press). The main idea behind their material was that two excerpts inside a target-distractor pair could elicit different movements. In other words, one excerpt inside a pair would elicit a certain movement while the other excerpt would elicit another qualitatively different movement. Each pair of excerpt was taken from a single track that allowed the creation of such a pair. Peckel and Bigand (in press) further made the distinction between two types of changes among pairs, resulting in specific movement changes. This distinction was not made in this experiment. This material was chosen for its potential to elicit different movements inside a target-distractor pair.

A total of 32 excerpts were chosen based on how participants performed in the previous study. More precisely, 16 pairs out of the initial 20 were selected based on their average Hit rate among the participants who danced on them (a total of 45 participants). In that sense, four excerpts and their related excerpt inside a pair were dismissed. This selection was done in order to keep the pairs that led to the best performances in the previous experiment in which participants danced.

In the end, the musical material consisted of 16 pairs of excerpts for a total of 32 excerpts. The excerpts inside a single pair were selected in order to elicit different movements in the listeners. The complete track list and locations of each excerpt within a track is reported in the Appendix section.

2.3 Procedure

The experiment consisted of three separate phases. The first phase consisted of an encoding phase where participants listened to one randomly selected excerpt from every target-distractor pair of excerpt. The second phase of the experiment was a recognition test along with a source memory test. The third phase was a post-test designed to assess the perceived different in the movements elicited by the two excerpts inside a target-distractor pair. In other words, participants evaluated the extent to which the two excerpts inside of a pair elicited different movements in them.

In the first phase, participants were either told to move along to music (Dance) or to simply listen to music without moving (Stand). Participants were also required to perform their task either on the left or on the right side of the soundproof room in which the experiment took place. The participants thus had to perform four different tasks. Instructions on the precise task to perform were given to the participants on a laptop screen in front of them. This instruction disappeared before the musical excerpt was presented. The order of the excerpts, the task and the side were counterbalanced and randomized.

Five minutes after encoding, participants were given a recognition task. Participants were not aware of the upcoming recognition task until they were explained the second phase of the experiment. All of the 32 musical excerpts (targets and distractors) were randomly

presented to the participants and their task was to determine, for each excerpt, if it had been presented in the encoding phase. Furthermore, if participants answered positively (i.e. “I have heard it in the first phase”), they were asked to determine whether they danced on it and on which side of the room they were positioned. The order of the questions regarding the context of learning was randomized. The excerpts were shortened to the middle 10-second section of each excerpt to minimize testing time.

In the third phase of the experiment, participants evaluated on a scale from 1 to 7 the extent to which the excerpts inside a pair elicited different movements in them. Participants were explicitly told that it was related to “How differently do these two excerpts make me want to move?”. Excerpts were presented in pairs and the first excerpt presented inside a pair was randomly selected.

After the experiment, participants were asked to fill in a questionnaire about their musical and dancing experience.

3. Results

Our main goal was to assess the impact of moving along to music on subsequent recognition and source memory. In order to test recognition performance, the sensitivity (d') index was calculated by subtracting the standardized (z-score) false positive rate from the standardized hit rate for each participant. Although participants performed the task in four different settings, we merged the Left and Right performances as we did not expect a main effect of the Side variable on the recognition performance.

One might argue that handedness and side (Left/Right) could interact in the test phase. Namely, left- and right-handed participants might perform better when the song is encoded on their “preferred side”. If it was the case, considering that almost all of our participants were right-handed, we should find better memory performances (more hits, less misses) when music is encoded on the right side. Considering all participants, we found, on average, identical numbers of HIT and Misses when music was encoded on the Right (5,97 Hits and 2 Misses) and when it was encoded on the Left (6 Hits and 2,02 Misses).

Therefore, a 2 within-factor (*Dance, Still*) repeated measures analysis of variance (ANOVA) was performed on the sensibility index (d'). Analyses revealed no effect of the Task variable ($F(1,34)=0.02$, $p=.878$), indicating that participants did not perform differently when dancing ($d'=.98 \pm .71$) and when simply listening to the excerpts ($d'=1.00 \pm .62$).

Regarding source memory, we took trials where participants correctly identified excerpts as targets (Hits) and calculated how often they correctly reported the encoding context. In order to examine the impact of the encoding context on how the side was correctly identified, a 2 (Right, Left) x 2 (Dance, Still) repeated measure ANOVA analysis was performed on the rate of correct side identification. No main effect of Task was found ($F(1,34)=.006$; $p=.938$), indicating that dancing and standing yielded similar results regarding correctly identifying the side on which it was performed. No main effect of Side ($F(1,34)=.356$; $p=.555$) and no interaction were found ($F(1,34)=1.353$; $p=.253$).

We further examined the impact of the encoding context on how the task was correctly recalled. We thus performed a 2 (Right, Left) x 2 (Dance, Still) repeated measure ANOVA analysis on the rate of correct task identification. Analyses revealed no main effect of the Task variable ($F(1,34)=.000$; $p=.98$), indicating that dancing and standing still yielded similar results regarding correctly identifying the task performed while hearing a track. No main effect of Side ($F(1,34)=.209$; $p=.65$) and no interaction were found ($F(1,34)=.25$; $p=.12$) either. A detailed summarize of the results can be found in Table 1.

Table 1: Sensibility indices (d') and correct response rate (%) of task and side encoding contexts.

Encoding	d'	Asked		Mean
		Task	Side	
Dancing	1	60.0	56.5	58.2
Standing	0.98	59.9	56.9	58.4
Right	-	61.1	59.5	60.3
Left	-	58.8	54.9	58.8

Previous analyses revealed that dancing and standing still while listening to music did not have a differential impact on item and source memory. It may be that the effect of a motor involvement on memory lies more in the distinction between the target and distractors than in the task itself. The third phase of the experiment was designed to assess the perceived difference in the movements elicited by the two excerpts in one target-distractor pair. On average, the evaluations ranged from 1.74 to 5.51 out of 7 with an average of 3.97 (± 1.07). The evaluations of the difference were very consistent among participants (normalized $\alpha=.754$). In order to test whether ratings could be related to performances, we conducted a correlation analysis between evaluations of perceived movement difference and memory indices related to new excerpts (i.e. correct rejections and false alarms) in both tasks. Hits and Misses were not taken into account as they are only related to old excerpts. Correlation analyses revealed that evaluations were positively correlated to the number of correct rejections when participants danced ($r=.61$; $p=.01$) and also when they listened ($r=.50$; $p=.048$). It also revealed that evaluations were negatively correlated with the number of false alarms ($r=-.59$; $p=.01$) when participants listened ($r=-.60$; $p=.01$) but only marginally when they danced ($r=-.49$; $p=.054$). These results suggest that the greater the perceived differences in elicited movements, the better the excerpts are distinguished. When excerpts are perceived as eliciting very different movements (i.e. high rating), new excerpts were more likely to be correctly rejected and less likely to be taken for old excerpts (false alarm). Contrariwise, when the excerpts were eliciting very similar movements (i.e. low rating), new excerpts were more likely to be considered as old excerpts (false alarms). This appears to be true for both dancing and standing still conditions.

4. Discussion

The present study assessed whether moving along to a musical piece does influence its recognition (episodic memory) and enhance the retrieval of the contextual information related

to the encoding of the musical piece (source memory). The main idea was that representations of actions and perceptions interact with each other and that musical affordances help us build meaningful motor representations of music which should be observable as subsequent memory effects. Furthermore, asking participants to move according to the music would put them “in the groove”, increasing their self-involvement, enjoyment and sensorimotor coupling with music (Janata et al., 2012). According to embodied cognition accounts, this should result in a multi-modal representation of the track in memory: auditory and motor information are integrated into a shared representation. This more elaborate representation should help participants recognize the song when they danced to it as opposed to when they stood still while listening to the song as it should provide additional retrieval cues. A within-subject design was chosen to further enhance the distinction between excerpts on which participants moved and the others. Moreover, this multi-modal representation should also convey richer contextual information when participants danced to the song, ultimately enhancing the participants’ ability to retrieve the contextual information associated with the encoding.

Surprisingly, we found no difference in recognition performance when participants danced and when they stood still while listening. Although this might seem in contradiction with the literature on the general impact of music on memory enhancement, a few studies have suggested that this audio-motor effect is not as simple as it would seem. For example, Moussard, Bigand, Belleville and Peretz (2012) recently demonstrated that a musical context in a motor learning task could sometimes put participants in a dual-task situation, leading to poorer performances compared to a silent encoding (see also Racette and Peretz, 2007). Regarding our experiment, we could thus argue that participants were put in a dual-task situation. In that sense, participants would have been inclined to split their attention between moving along to music and trying to encode it. However, if it was the case, we should have observed better performances for excerpts during which participants stood still. We did not observe any difference in memory performances between the two tasks.

Moreover, Brown and Palmer (2012) found that in order for an auditory-motor association to be beneficent to the encoding phase, music and movement had to be closely linked. While this might be true for very specialized instrumental knowledge, the movement-inducing power of music may allow participants to associate relevant movements to music they are hearing. However, as Peckel and Bigand (in press) have suggested, the shallow processing of musical material involved in the expression of musical affordances might not be beneficial to memory. They found that moving along to music was detrimental to recognition performances. Peckel and Bigand (in press) stated that in comparison with a condition where participants only listened and assessed the excerpt’s pleasantness, moving along to music was deemed to involve shallower processing, leading to poorer memory performances in accordance to level of processing accounts (Craik, & Tulving, 1975). In our experiment, no particular assessment of the musical stimuli was required. Participants only had to perform four different tasks while listening to music. One could thus argue that our lack of effect might come from the lack of cognitive assessment of the musical stimulus (i.e. which would have led to deeper processing). This deeper processing would have only manifested itself in the standing still condition as a motor processing (moving along to or evaluating its dance-

ability) would have led to shallower processing. Ultimately, not asking anything about the excerpts might not have made a difference between the two tasks.

In addition, this result could also be attributed to the supposedly automatic motor processing of a musical material when listening (e.g. Clarke, 2005, Stupacher et al., 2013). In other words, when participants only listened to the excerpts, we could argue that the musical material was processed in the same fashion as it was when they moved along to it. We could argue that listening to the excerpts also led participants to simulate motor-related representations (affordances). In that sense, it might not have made a difference to move along to music and to listen when participants had to determine whether they moved or stood still while listening to a particular excerpt. In both tasks, participants supposedly processed the musical material in a motor fashion; covertly in the listening task and overtly when moving along to it.

The post-test we performed yielded results that tend to support this explanation. Namely, we found a correlation between evaluations in terms of difference in elicited movements and memory performances. Most importantly, this correlation was found in both tasks. This suggests that participants might have processed the excerpts in a motor fashion when they danced and when they stood still. The fact that this motor assessment would also be involved in listening is in line with neuroimaging studies suggesting the involvement of motor and premotor brain areas in music listening tasks (see Zatorre, Chen & Penhune, 2007). For example, Wilson & Davey (2002) reported an increased corticospinal excitability of the ankle muscles during strongly rhythmic music listening (see Grahn & Brett, 2007 for an fMRI study). Likewise, Stupacher et al. (2013) have shown that high-groove music engages the motor system in listeners. They documented greater motor-evoked potentials (MEP) in the hand and arm muscles during high-groove than in low-groove music listening. Hence, in our listening condition, it is most likely that the motor potentiality of a song was automatically assessed when listening (affordances).

Perhaps the most informative information gathered in the post-test is that the movements elicited by a song might be a feature on which participants relied to tell excerpts apart, independently of the task. We found that the greater the perceived differences in elicited movements, the better the excerpts were distinguished. When a pair of excerpts elicited very different movements, the distractor excerpts were more likely to be correctly rejected. On the contrary, when excerpts elicited very similar movements, the distractor excerpts were more likely to be considered as old (false alarm). This result is in line with Peckel and Bigand's (in press) finding that participants relied on "the groove" of excerpts to differentiate them. They found that excerpts inside a pair that were associated with a change in groove (i.e. dynamics) were more likely to be correctly distinguished from each other. Moreover, excerpts which groove did not change inside a pair of target-distractor were more likely to be confused. New unheard items were more often identified as old ones when the two excerpts had the same groove. The groove being defined as a musical quality that makes people want to move along to music, we could further argue that our participants assessed the difference in groove between two excerpts. As Janata et al. (2012) observed with the assessment of groove, participants' evaluations of the difference in elicited movements

between two excerpts were consistent in our experiment. In sum, this explanation suggests that in both tasks (dancing/standing), participants might have processed the “motor potential” of each song (musical affordances). In other words, we could argue that the music-induced movements were already part of the representation of the excerpts that were heard. It did not make any difference to move along to the music as these motor information were already represented in memory during perception. Moving along to music did not add motor contextual information to the encoding phase as it was already there.

Regarding the lack of difference in source memory performances, we could argue that standing still and moving along to music did not yield different contextual information. We argue that moving along to music, due to its perceptually-based processing (musical affordances), did not result in relevant or strong enough contextual information. Like Peckel and Bigand (in press) suggested, participants that were moving along to music were most likely involved in the “here-and-now”, leading to no contextual information being created. Listening to the excerpts did not create any specific contextual information either. In other words, the lack of difference in source memory might have been due to the participants not creating contextual information in the first place. We could further argue that participants did not give random contextual information because they relied on the textual information given on the screen telling them what they would have to do.

To conclude, our results give support to the notion that music is processed in a motor way, independently from the task (auditory or motor). However, as we found no difference between the task, this interpretation could only be speculative and needs to be tested in future research. Our initial assumption was that participants would benefit from their ability to interact with music in their memory performance, in line with theories of embodiment, and in keeping with the idea that movements may help 'elaborate' on the music. Surprisingly, we did not find any difference in item memory and source memory for two tasks supposedly involving different processing. These unexpected findings are readily explained in terms of the representations that were created during the encoding phase. When participants listened to the excerpts in both tasks, they processed the musical material in a perceptual way and assessed its motor potential as musical affordances accounts would suggest. Asking participants to focus on the task at hand might have further biased them to process the musical material in a motor fashion. Furthermore, the lack of any kind of cognitive processing in both tasks led to an absence of deep processing of the musical material. This cognitive processing was shown to enhance participants' recognition performances (Peckel and Bigand's, in press). The recognition of the encoding context was also similar in both tasks most likely because participants automatically processed motor-related information independently of the task. In that sense, when participants had to remember if they moved along to an excerpt, they might have been unable to differentiate between simulated and actual movements induced when hearing music. Moreover, we also found that participants in both tasks relied on the perceived difference in elicited movements inside a target-distractor pair of excerpts. This gives further support to the notion that motor-related information was processed in both auditory and motor tasks alike.

Further research is thus needed in order to set the boundary between a detrimental and a beneficial effect of music embodiment on memory. Future research might want to look further into the match between performance and sounds. While musical affordances can give participants the ability to interact with music, they are generic by definition. As suggested by Janata et al. (2012) and Godøy et al. (2006a, 2006b), the action schemata that are related to music perception can be used in almost every musical situation, as long as rhythmical features can be extracted. For that reason, music-induced movements might not be the most appropriate approach to test explicit memory, as we tended to demonstrate. Moreover, future research should examine the contribution of either music-induced movements or “odd” or difficult movements in regards to episodic memory. As we suggested, the spontaneous movements might be already part of the representation in memory. Associating music with movements other than music-induced movements might then enhance the distinctiveness of these excerpts. Future research should also explore the possibility that assessing musical affordances without moving could be more beneficial than actually performing them. Like our post-test suggested, the “motor potential” of excerpts seems to be a feature on which participants tend to rely to tell excerpts apart.

In sum, our ecological approach has the merit of being representative of how people interact with music in normal circumstances. When people are interacting with music in a nightclub, for example, they tend to spontaneously move along to music in different ways. We could argue that these people should not later remember the songs they danced to any better. Most importantly, whilst movement may change how we process musical stimuli, our findings suggest that an improvement in later recognition of the music is not an inevitable consequence.

Troisième étude: The impact of the perception of rhythmic music on self-paced oscillatory movements.

Mathieu Peckel¹, Thierry Pozzo^{2,3,4}, Emmanuel Bigand¹

¹ Laboratoire d'Etude de l'Apprentissage et du Développement, Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Bourgogne, Dijon, France.

² Unité 1093, Cognition, Action et Plasticité Sensorimotrice, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), Dijon, France.

³ Institut Universitaire de France, Université de Bourgogne, Campus Universitaire, UFR STAPS Dijon, France

⁴ Robotics, Brain and Cognitive Sciences Department, Istituto Italiano di Tecnologia, Genoa, Italy

Abstract

Inspired by theories of perception-action coupling and embodied music cognition, we investigated how rhythmic music perception impacts self-paced oscillatory movements. In a pilot study, we examined the kinematic parameters of self-paced oscillatory movements, walking and finger tapping using optical motion capture. In accordance with biomechanical constraints accounts of motion, we found that movements followed a hierarchical organization depending on the proximal/distal characteristic of the limb used. Based on these findings, we were interested in knowing how and when the perception of rhythmic music could resonate with the motor system in the context of these constrained oscillatory movements. In order to test this, we conducted an experiment where participants performed four different effector-specific movements (lower leg, whole arm and forearm oscillation and finger tapping) while rhythmic music was playing in the background. Musical stimuli consisted of computer-generated MIDI musical pieces with a 4/4 metrical structure. The musical tempo of each song increased from 60 BPM to 120 BPM by 6 BPM increments. A specific tempo was maintained for 20s before a 2s transition to the higher tempo. The task of the participant was to maintain a comfortable pace for the four movements (self-paced) while not paying attention to the music. No instruction on whether to synchronize with the music was given. Results showed that participants were distinctively influenced by the background music depending on the movement used with the tapping task being consistently the most influenced. Furthermore, eight strategies put in place by participants to cope with task were unveiled. Despite not instructed to do so, participants also occasionally synchronized with music. Results are discussed in terms of the link between perception and action (i.e. motor/perceptual resonance). In general, our results give support to the notion that rhythmic music is processed in a motoric fashion.

Keywords: Embodied music cognition, oscillatory movements, musical tempo, motor resonance, motor constraints, musical affordance, motion capture, music perception

1. Introduction

The notion that perception is linked to action is not new. William James famously claimed that “*every representation of a movement awakens in some degree the actual movement which is its object*” in his ideomotor theory of action (1890). In more recent years, McGurk and MacDonald (1976) notably demonstrated that the auditory perception of spoken sounds interacted with the perception of the facial movements used to produce syllables (i.e. the McGurk effect). Liberman and Mattingly (1985) further theorized about this in their motor theory of speech perception, postulating that hearing speech automatically activated the corresponding motor commands necessary to produce the sounds, ultimately facilitating comprehension in the listener. A few years later, Jeannerod (1994), Decety (1996) as well as Berthoz (1997) suggested that there was a motor aspect in the perceptual system. They suggested that the perception or imagery of an action led to the internal simulation of that action at a neural level. Insights into the neural substrate of this motor simulation in perception came with the discovery of the mirror neuron system in chimpanzees (Gallese et al. 1996; Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti, & Craighero, 2004 for a review). These mirror neurons were described as a specific type of neurons that activated during both action observation and performed actions, directly coupling perception to action. They were first studied in the visuomotor domain where the observation of an action led to the same activation as the actual action being performed by the observer. Much like speech in humans, the same sensorimotor interactions were also observed in the audio-motor domain, where listening to the typical sound produced by a learned action activated premotor areas in monkeys (e.g. Köhler et al., 2002).

These discoveries were in contradiction with the classical cognitive theories at the time which depicted the human mind as an information processor that relied on abstract, a-modal representations of the world. This traditional perspective, despite its success, began to be criticized for neglecting the relationship between the body and its environment (e.g. Varela, 1993). In that sense, amounting experimental evidence demonstrated that bodily states, perceptual systems and actions underlie information processing (see Wilson, 2002). This new approach, referred to as “embodied cognition” emphasizes the fact that cognition is grounded in sensorimotor processes and that knowledge includes sensorimotor representations of both motor and perceptual information (e.g. Barsalou, 2008; Shapiro, 2010). Within this embodied cognition framework, Prinz (1997) as well as Hommel, Müsseler, Aschersleben and Prinz (2001) suggested that the planning or the execution of an action and the perception of its related sensory consequences are encoded in a shared representation in the brain. As a result, whenever one of the two components is activated, both motor and sensory areas in the brain are recruited. This combination of sensory and motor representations leads to the creation of internal models relative to the relationship between the two. In that sense, these models can either contain inverse or forward components (Wolpert et al. 1995). On the one hand, inverse models (also known as *motor resonance*) refer to the way perception activates the corresponding motor commands required for such sensory state to be achieved (e.g. Jeannerod, 1994; Prinz, 1997; Rizzolatti et al. 2001). On the other hand, forward models (also known as *perceptive resonance*) refer to the way actions activate sensory states. In other

words, the system predicts the sensory outcomes of the executed or planned action (Davidson, Wolpert, 2005 for a review).

In an effort to further the understanding of this relationship between action and perception, the embodied cognition theories have also been applied to music cognition which was deemed appropriate due to its close link with movement (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007). Like Clarke (2005) suggested, music is movement in the sense that movements have to be produced in order to create music. Accordingly, theories of embodied music cognition (e.g. Leman, 2007) suggested that both movements (e.g. playing an instrument) and their perceptual consequences (e.g. tones) were encoded in a shared representation (Godøy & Leman, 2010). For example, Repp and Knoblich (2007) showed that the direction of the movement on a piano keyboard determined how an ambiguous rising/falling tone was perceived (i.e. perceptual resonance). The bias was congruent with how rising and falling tones are usually played on a piano (left to right and right to left, respectively). Moreover, Drost, Rieger and Prinz (2007) found a motor resonance effect in guitarists when a note that was not the note beginning the piece they had to play was heard. Participants effectively took more time to start playing when the note was incongruent than when it was congruent. In line with Kohler et al.'s (2002) study, neuroimaging studies have further documented that music listening was associated with an activity in the motor areas of the brain in experts and novice alike (Haueisen & Knosche, 2001; Lahav, Saltzman & Schlaugh, 2007; Grafton & Brett, 2007). Bangert et al. (2006) showed that the opposite was also true in the sense that playing on a muted piano keyboard also led to auditory activations in the brain. Interestingly, as Godøy et al. (2006) showed, these auditory-motor associations were also expressed through spontaneous movements in responses to music. In their experiment, participants were asked to pretend playing the piano (i.e. playing an "air instrument") according to the piano performance they were hearing. Godøy et al. (2006) found that movements relative to synchrony with the beat and the rendering of the dynamic of the musical piece were relatively good for novices and experts alike.

In that sense, in addition to this ecological instrumental knowledge about music, research has also been devoted to understanding the link between music and movement through the spontaneous movements usually performed when listening to it (e.g. Lesaffre et al., 2008; Keller, Rieger, 2009). For example, Naveda and Leman (2010), Toiviainen, Luck and Thompson (2010) as well as Burger, Thompson, Luck, Saarikallio and Toiviainen (2013) suggested that music-induced movements were mainly built on the musical pulse (i.e. the beat) in expert and untrained dancers alike. Dancers would take the beat as a temporal cue and build movements around the pulse, synchronizing their movements with it (Naveda and Leman, 2010). They also suggested that the dance movements were sensitive to variations in rhythmic features (Burger et al. 2013) and that they were performed in a hierarchical fashion according to different metrical levels (Toiviainen et al. 2010). Listeners would in fact embody the different metrical levels by performing rhythmic movements with different parts of their body according to the part's motor capabilities. More precisely, lower metrical levels (i.e. slower) were associated with limbs that could only move slowly (e.g. torso) while higher

metrical levels (i.e. faster) were represented with limbs that could move faster (e.g. hands, forearms).

Toiviainen et al. (2010) further suggested that the choice of certain limbs over others to move along to music might have been dictated by the integration of biomechanical motor constraints in the auditory-motor system. This idea that the motor system constrains the way we interact with music was also conveyed by Clarke (2005) and Godoy (2010) in their ecological approach to music. They suggested that listeners should be more likely to resonate in a corporeal way with music that could afford movement (i.e. motor resonance, see also Large, 2008). Additionally, Todd, Cousins and Lee (2007) as well as Dahl, Huron, Brod and Altenmüller (2014) have demonstrated that the individual motor constraints had an impact on how music is perceived through perceptual resonance and also on how musical preferences might be formed. The perception of the “groove” of music might also rely on a similar assessment of the motor potential of music depending on the capabilities of the listeners (Keil, & Feld, 1994; Iyer, 2002). When the music “feels right” to the listeners, they might start moving different parts of their body along to music (Janata et al. 2012; Madison, 2006). These findings further suggest that music perception is really a perceptual as much as a motor activity.

On a neurobiological level, these motor constraints appear to be hardwired in the motor system itself and express themselves through optimal movements, allowing the production of motion at a minimal energetic cost (Todorov, 2004). These constraints are most noticeable in a simple system such as pendular rhythmic movements. As Holt, Jeng, Ratcliffe & Hamill (1995) have suggested, these pendular movements are most energy efficient when they are performed at their resonant frequency, which is determined by the physical features of the pendulum (i.e. length, mass, etc. of the limb). These particular rhythmic movements are thought to be effectively tuned to their resonant frequency by neural networks known as central pattern generators (CPG) (e.g. Verdaasdonk, Koopman, Van Der Helm, 2005). Taking into account its kinematic parameters (e.g. gravity, limb used, joint viscosity, etc.), CPGs generate alternated stimulation of antagonist muscles groups to tune a limb to its resonant frequency and produce optimal rhythmic movements (see MacKay-Lyons, 2002 for a review).

In order to better understand how music might be related to movement, researchers in embodied music cognition also studied the interaction between music and some of these constrained oscillatory movements. For example, Styns, van Noorden, Moelants and Leman (2007) and Leman et al. (2013) were interested in understanding how walking (i.e. the most common action relying on CPGs, see Miall, 2007) could be related to listening to rhythmical music. They asked participants to synchronize their walking pace to various rhythmical musical pieces and found that participants were mostly accurate in synchronizing their walking with the music through a variety of tempi. Interestingly, their synchronization with music was most accurate when its tempo was around 120BPM (or 2 Hz) which is usually associated with the optimal walking pace (see MacDougall & Moore, 2005) as well as the most perceived and represented tempo in a very large variety of western musical pieces (over 74000 pieces, see van Noorden & Moelants, 1999; Moelants, 2002).

In the current study, in a similar fashion, we suggested investigating the way in which music is related to movements in listeners by examining how motor resonance in the context of music perception might be mediated by motor constraints. Recently, Demos, Chaffin and Marsh (2010) investigated the impact of background music on rhythmic movements performed at a preferred tempo (self-paced). They asked participants that sat in a rocking chair to sway at their preferred rate during a memory task whilst music was played in the background. They found that listeners were sensitive to the musical beat even when they were not instructed to attend it. However, as suggested by Demos et al. (2010) themselves, their experiment could only provide data on self-paced movements related to the use of the rocking chair. Rocking chairs having a resonant frequency of their own, participants merely adapted their movements to keep the rocking chair going, compromising the very notion of “self-paced” movements.

The current study went further in investigating the impact of rhythmic music perception on cyclic movements using limbs which biomechanical constraints may differ. This allowed us to oppose the natural tendency of people to move at an optimal tempo (i.e. motor constraints) and their tendency to interact with music which might resonate with their motor system (i.e. motor resonance) in a wider range than previously studied by Demos et al. (2010). Ultimately, we were interested in documenting how individuals would, if ever, adjust their movements in the presence of a musical beat, depending on the limb used to move and the tempo of the music. In order to examine this particular issue, we conducted an experiment in two parts. The first part examined the kinematics of different self-paced oscillatory movements (i.e. expressing the motor constraints) along with walking and finger tapping. The purpose of this part was to have a better understanding of the parameters we would try to modify later. In the second part of the study, we wanted to examine the effect of music perception on self-paced oscillatory movements. Based on the assumption that different limbs are tuned to different resonant frequencies, we used rhythmic music, the tempo of which was increasing by increments. This increasing tempo would allow us to study the online influence of music on movement as well as to vary the amount of attractivity (or interference) the music would have on the movements. We could then expect that music which tempo is near the resonant frequency of a movement to interfere to a greater extent than music which tempo is more distant. Furthermore, we also wanted to investigate precise moments in the experiments; namely when music started, stopped and, if applicable, when participants’ movements were synchronized with the music.

2. Study One

2.1 Introduction

The purpose of this first study was to investigate the kinematic parameters of oscillatory movements. Namely, we were most interested in the hierarchy of the different movements depending on their proximal/distal characteristics. According to the biomechanical constraints account, we should observe that the different limbs’ resonant frequencies support a hierarchical organization. More precisely, if we consider a particular limb as a compound pendulum consisting of a rigid body swinging around its axis (i.e. joint),

its length and mass should determine its period of oscillation. Because more distal limbs are characterized by a shorter length and lower mass than their depending proximal limb (e.g. forearm compared to whole arm), they should oscillate faster. In that sense, more distal limbs should have a higher natural frequency than more proximal limbs. Furthermore, we also predict that functionally related limbs (i.e. hip and shoulder in walking) should have similar natural frequencies because they rely on a coordinate action during walking (Wagenaar & van Emmerik, 2000).

2.2 Materials and Methods

2.2.1 Participants

A total of 11 participants took part in this first study. Six men and five women participated in this study. Their average age was 28 year old. All the participants were either Master, PhD or Post-doc students from the University of Burgundy.

2.2.2 Apparatus

The experiment took place in the purposely built Motion Capture laboratory available at the INSERM U1093 laboratory. A BTS SMART 3D Motion Capture System (BTS Bioengineering Corp., NY, USA) (sampling rate: 120Hz) was used to capture the participants' movements. The nine cameras provided with the system were placed in a 210° semi-circle around the area where the participants had to perform their movements. Six cameras were placed about 3 meters from the area while the remaining three cameras were placed 1.5 meter from the participant to allow for precise measurement of small movements. Eight passive markers were placed on each participant: their location can be found in Figure 1 (A). Markers were put on the side that participants felt most comfortable with.

2.2.3 Procedure

Participants were required to perform six different self-paced oscillatory movements. Before each movement, participants were asked to perform a small memory test. The experimenter gave them a short story to read and asked them to recall it immediately after⁷.

Participants were told they would have to perform five pendulum-like oscillatory movements as well as a tapping task. Participants were asked to use only one joint at a time. Movements were explained verbally to the participants to avoid any imitational behavior. It was explained to participants that the movements had to require the least effort possible and had to be performed in the most "natural" way possible. Movements used during the experiment can be seen on Figure 1. Movements are referred to as their corresponding joint. For example, the whole leg oscillation (B) is referred to as *Hip* while the lower leg oscillation (C) is referred to as *Knee*.

⁷ The purpose of this test was to focus the participant's attention on a different task than the movements they would have done and/or have yet to perform. This was done to avoid the potential influence of a movement (fast or slow) onto the next one; known as the carry-over effect.

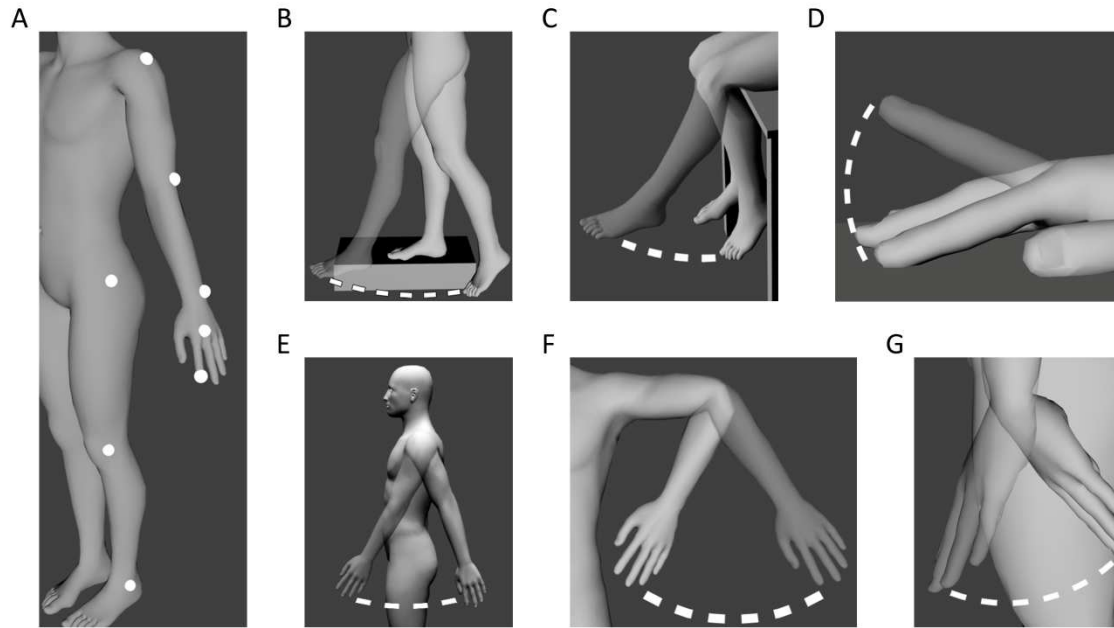


Figure 1. Location of the markers and performed movements. **(A)** Location of the eight markers on the participants. **(B)** Whole leg oscillation (*Hip*). **(C)** Lower leg oscillation (*Knee*). **(D)** Finger tapping (*Tapping*). **(E)** Whole arm oscillation (*Shoulder*). **(F)** Forearm oscillation (*Elbow*). **(G)** Hand oscillation (*Wrist*). All movements were performed in the sagittal plane except (F) which was performed in the coronal plane.

As seen on Figure 1, additional support was given to the participants for whole leg oscillation (B) and lower leg oscillation (C) for maximum stability. Participants had their arm held in the air with a soft strap to minimize fatigue for the forearm oscillations (F). Participants tapped on a table while being seated (D).

For each movement, participants were asked to remain as constant as possible throughout the recording. Each trial lasted just over two minutes and a half in total. The experimenter asked the participant to start the movement and not to stop before being told to. The whole recording session consisted of 12 ten-seconds trials and started after a 1 minute warm-up for each movement. Movements order and stories for the memory task were randomized for each participant. Participants were told to close their eyes to avoid any visual interference.

In a second session, participants were also required to perform a walking task. Participants had to walk at their preferred pace in a 6m long corridor drawn on the floor for a total number of 12 passages. Participants started walking before entering the 3D working space. Their movements were recorded using the same 3D Motion Capture cameras with a different camera placement (sampling rate: 120Hz) allowing for a bigger 3D working space.

2.3 Results

2.3.1 Data processing

In the oscillatory movements and walking tasks, raw data consisted of 3D coordinates in the 3D working space. Using a purposely built program for 3D motion capture analysis in Matlab (Mathworks Inc, MA, USA), the signal was first filtered using a low-pass Butterworth filter with a cut-off frequency of 5 Hz. The waveforms were then converted to the frequency domain using a fast Fourier transform (FFT). The dominant peak in the resulting spectrum of amplitudes was identified using a peak finding function in Matlab. Exploitable data thus consisted of the average frequency (Hz) of the 12 trials for each movement and each participant. It is noteworthy that not all markers' data were used because some markers were not relevant to analyze a limb's resonant frequency. For all the lower limb movements and the walking task (Figure 1 B and C) the ankle marker was used to compute the oscillation frequency. For all the upper limb movements (Figure 1 D, E, F, G) the finger marker was used to compute the oscillation frequency. In the walking task, for comparison purposes, an oscillation was deemed equivalent to the time between one foot touching the ground and the same foot touching the ground on the next step. This time corresponds to a full oscillation of the whole leg around the Hip joint. Because this oscillation had to be captured while the participant was walking, its frequency was calculated using its Y-axis coordinates.

2.3.2 Comparison between oscillatory movements

We were interested in examining how the different oscillatory movements were related to each other. A repeated measures ANOVA analysis revealed a main effect of the movement ($F(4,36)=5.19, p=.002$). A summary of the results can be found in Table 1. In order to test the hierarchy of the different oscillatory movements, planned one-tailed t-tests were performed. A Bonferroni comparison correction was applied to the tests in order to account for the multiple comparisons. Analyses showed that Knee movements were faster than Hip movements ($t=5.35, p<.001$). Elbow movements were faster than Shoulder movements ($t=3.38, p=.017$) but were not found to be faster than Wrist movements ($t=.91, p=.96$). Furthermore, Wrist movements were not faster than Shoulder movements ($t=2.31, p=.11$). Finally, Hip movements were not found to be faster than Shoulder movements ($t=1.01, p=.83$). In sum, limbs follow a hierarchical organization in the sense that distal limbs are faster than proximal limbs. However, Wrist movements were not found to be faster from more proximal arm movements (i.e. Shoulder and Elbow). It is worthy to note that the notion of “not faster than” is not interpretable as statistical analyses are meant to detect differences. The absence of statistical difference does not, under any circumstances, mean that the two values are identical. The mean frequencies of each movement can be found in Figure 2A.

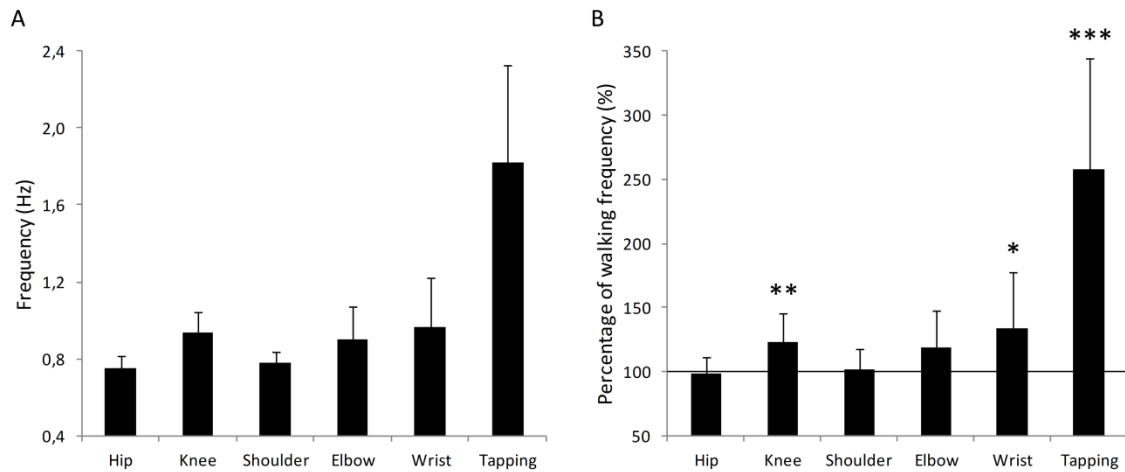


Figure 2. Comparison between the six movements performed during the experiment. **(A)** Mean frequency (Hz) for each movement. Movements are referred to as their corresponding joint. Error bars represent standard error. **(B)** Each movement frequency is represented relative to the mean walking frequency for each participant, corresponding to the value 100%. Error bars represent standard error. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Table 1: Statistical differences between the five oscillatory movements (one-tailed t -tests)

	Hip 0.75 Hz ($\pm .06$)	Knee 0.94 Hz ($\pm .11$)	Shoulder 0.78 Hz ($\pm .06$)	Elbow 0.90 Hz ($\pm .17$)	Wrist 0.97 Hz ($\pm .26$)
Hip		5.91***	1.01	-	-
Shoulder				3.38*	2.31
Elbow					.91

* $p < .05$ *** $p < .001$ (Bonferroni corrected)

The finger tapping task yielded the highest frequency (1.82 Hz $\pm$ 0.50) but does not qualify as a pendulum movement and thus was not comparable with the others. Nevertheless, it is interesting to note that finger tapping frequency was close to the 2Hz usually found to be the preferred tapping rate (e.g. Fraisse, 1982; Moelants, 2002).

2.3.3 Comparison between walking frequency and other movements

The next step in our investigation was to compare the resonant frequencies of the participants' limbs to their walking frequency. For this purpose, for each participant, their mean walking frequency was given the value 100% and compared to all other movements.

All values (%) were compared to the 100 standard, representing the walking frequency. Statistical analyses revealed that Hip (mean= 98.1, $t = -0.51$, $p = .620$), Shoulder (mean=101.8, $t = 0.38$, $p = .712$) and Elbow (mean= 118.7, $t = 2.14$, $p = .057$) were not different from the walking frequency (100%). The other 3 movements were statistically different from 100 (Knee, $t = 3.42$, $p = .006$; Wrist, $t = 2.61$, $p = .025$; Finger, $t = 6.01$, $p < .001$). The comparison between individual walking pace and limb movements are presented in Figure 2B. These

results suggest that the Hip, Shoulder and Elbow joints might be functionally related to walking as their natural frequencies in a self-paced pendulum-like oscillatory task are similar to the walking frequency. Once again, it is worthy to note that while statistical analyses did not reveal a statistical difference, it does not mean they are identical.

2.4 Discussion

This first experiment investigated the relationship between different self-paced oscillatory movements performed with different limbs. Not surprisingly, results showed that the hierarchy in the natural frequency of limbs is in accordance with biomechanical constraints accounts; namely, bigger limbs oscillate more slowly than smaller limbs. In the same sense, these results also show that the proximal limbs (Hip and Shoulder) oscillate slower than their corresponding distal limbs (Elbow and Knee).

Interestingly, results also suggested that both proximal joints (Hip and Shoulder) oscillated at a similar frequency. This is particularly remarkable because the whole leg and the whole arm are different in terms of biomechanical characteristics. This would suggest that the constraints dictating the optimal frequency might not exclusively be based on the physical properties of the limb. Finding the same oscillation frequencies make sense when they are compared with the walking frequency of participants (Figure 2B). These results suggest that the constraints applied to both whole arm and leg might not be exclusively mechanical but also functional. This is in line with the results found by MacDougall and Moore (2005) who demonstrated that the mechanical properties of the body had no influence on the frequency at which walking was tuned. Because the arm and leg synchronize during walking, these two body parts might be hard-wired to function similarly even outside the context of walking.

3. Study Two

3.1 Introduction

As we suggested previously, we were interested in examining how movements that were typically tuned to optimal frequencies (i.e. oscillatory movements) could spontaneously interact with music. We proposed that the previously documented motor resonance associated with music perception might interact with motor constraints. In other words, we wanted to investigate how and when music perception could resonate with the motor system in the context of these constrained oscillatory movements. In this sense, we opposed the tendency of people to move at an optimal frequency (motor constraints) and the tendency of people to move along to music (motor resonance). Furthermore, we examined this in an online and continuous fashion with music the tempo of which was increasing in order to vary the affordance of music.

Accordingly, in Study One, we found that different limbs have different natural resonant frequencies. Limbs were organized according to their proximal/distal characteristic and followed biomechanical constraints accounts. Moreover, our data suggested that Hip and Shoulder movements were not different from each other due to their functional interaction in walking.

Based on these results, the main hypothesis of this second study was that different limbs should be distinctively influenced by the perception of music. Namely, the motor resonance associated with music perception should be mediated by difference motor constraints. This influence should present itself when music is first presented, when it stops and also during the whole song mainly in the form of an attraction to the musical pulse. Moreover, based on the assumption that the musical groove relies on a match between motor capabilities and relevant musical features, we should observe synchronization with music only when that match is perceived and it should be associated with pleasant feelings; when the music feels right, participants should tune in to it. In the same way, according to musical affordances accounts, participants should be more attracted to musical pulses on which they can move (i.e. musical affordance).

3.2 Material and Methods

3.2.1 Participants

In total, 15 new participants (i.e. different from Study One) took part. Nine women and six men participated in this second study. Their average age was 27 years old. All the participants were either Master, PhD or Post-doc students from the University of Burgundy. Five participants reported having played (or playing) instrumental music with an average of 9.8 years of practice (min 3, max 20).

3.2.2 Apparatus

For this second study, a Vicon 3D Motion Capture system (Vicon Motion Systems, UK) was used (sampling rate: 100Hz). Seven cameras were placed in a semi-circle around the 3D working area. One camera was placed closer to the working area in order to improve small movement measurement accuracy. The passive markers were positioned identically to the first study (Figure 1).

3.2.3 Material

Musical material consisted of six different songs purposely generated with the software Garage Band (Apple Inc., CA, USA) using MIDI loops. MIDI loops were chosen because their tempo could be changed without provoking too much distortion. The exact composition of each song is given in the Appendices section⁸. Every song was composed according to a 4/4 metric and started at a reference tempo (set in the software) of 60 BPM. The tempo increased incrementally by 6 BPM steps every 22 seconds. A particular tempo was maintained for 20 seconds and the transitions between two tempi lasted 2 seconds. In the end, participants heard 11 levels of tempo from 60 BPM to 120 BPM. The total length of each song was 240 seconds (20s * 11 levels + 2s * 10 transitions). Each song was different in genre and instruments. A 1.5s fade-in/fade-out at the beginning and ending of each song was added in order to avoid startling the participants. Music was delivered through a headset at a fixed volume for every participant.

⁸ The tracks are available online at <http://leadserv.u-bourgogne.fr/en/members/mathieu-peckel/pages/extraits>

3.2.4 Procedure

The experiment was presented as a study on relaxation through the means of self-paced oscillatory movements. Participants were told they would have to perform movements while listening to music. Participants were told the music would be increasing in tempo but should not be given attention. The participant's task was to maintain pleasant/natural/effortless movements throughout the experiment. The experimenter emphasized on the self-paced aspect of these movements.

Only four movements from the previous experiment were used. Given that whole leg and whole arm movements did not seem different in the previous experiment, only the whole arm movement was used. Moreover, the whole leg oscillation was not deemed appropriate to move along to music because it was too different from the music-induced movements involving the hip joint studied by Toiviainen et al. (2010). Namely, they found that hip movements in the context of moving along to music consisted of swaying movements with both legs supporting the whole body while our whole leg oscillatory movement was performed on one leg with the other one supporting the whole body. The wrist oscillatory movement was also dismissed as it was regarded as irrelevant to movements performed spontaneously with music. The remaining movements were thus: lower leg, whole arm and forearm oscillations (Figure 1, C, E and F, respectively) and the tapping task (Figure 1, D).

Before performing each movement, participants were given at least 1 minute to warm up their muscles and familiarize with the movement. When participants felt ready, the motion capture started. The whole session for one movement lasted 6 minutes (warming up not included). Participants started by performing the movement in complete silence for 1 minute for Baseline purposes. After this 1 minute Baseline, the music started and lasted for 4 minutes (240s). When music stopped, participants had to continue performing the movement for one additional minute (a period referred to as "Silence"). Movements and songs were randomized for each participant. Participants were told to close their eyes to avoid visual interference.

After each movement, participants were asked to fill in a questionnaire about their subjective rating of different moments in the recording session. Participants were asked to indicate on a timeline representing the recording session when the experiment was "Hard/Unpleasant" and when it was "Easy/Pleasant". The timeline was divided into 7 epochs: 1 epoch for the Baseline segment, 5 epochs during which music was present and 1 epoch for the Silence segment. This segmentation was used to simplify the rating. Participants were then asked to verbalize the reason why it was pleasant or unpleasant.

After having performed all the movements, participants were told to walk for 1 minute in a large circle inside the Motion Capture laboratory in complete silence. As in Study One, participants started walking before their movements were recorded to ensure it was not measured from a still start.

3.3 Results

3.3.1 Data processing

Raw data consisted of 3D (X,Y,Z) coordinates in space of all markers. Another Matlab program was purposely created to process the 3D Motion Capture data. Raw data was filtered using a one-dimensional order-7 median filter⁹. In order to compute the movement “tempo”¹⁰, the signal was first de-trended (i.e. centered around a 0 mean) to account for the eventual displacement of the participant inside the working area. We then extracted the onsets (in seconds) of the coordinates of all peaks along the movement axis on the same side (i.e. a full cycle, back and forth) using a peak finding function in Matlab. The tempo was then calculated by dividing 60 by the average inter-onset interval (IOI) **for a whole 20s segment**. Transitions between tempi were not taken into account.

In total, the recording was divided into 13 segments. The first segment, referred to as “Baseline” corresponded to the first minute of silence during which participants performed the movement without any music. The 11 next segments were the segments when music was present (e.g. segment 2 corresponds to 60BPM music while segment 12 corresponds to 120BPM music). The thirteenth segment, referred to as “Silence” corresponds to the last minute of silence at the end of the experiment.

In this second study, no motion capture data was collected for the walking task. The walking tempo of participants was measured by video analysis. Participants walked for a little more than one minute and the walking pace was calculated by measuring the number of steps taken in 60 seconds. This period of 60 seconds started after a few steps were taken.

3.3.2 Are movements performed in silence comparable between Study One and Study Two?

For comparison purposes, all frequencies in Study One were converted to BPM by multiplying them by 60. The normalized walking frequency in Study One was multiplied by 120 to be in accordance with the walking pace in Study Two. As we were interested in examining whether participants in study One and Two had the same baseline for each movement segment, we conducted five independent sample t-tests. Statistical analyses did not reveal any significant difference (Bonferroni corrected) between baselines taken from the two studies (Shoulder: $p = .675$; Elbow: $p = .357$; Knee: $p = .775$; Tapping: $p = .889$; Walking: $p = .751$). Like in the previous analyses, the absence of statistical difference does not mean that the values are identical. However, we can see that movements followed the same patterns as in Study One. The comparison of movements’ tempi depending on the task and study is presented in Table 2.

⁹ A one-dimensional order-7 median filter works by taking the median value of 7 consecutive data points around one point. Every window of 7 data points is processed separately and the signal is then reconstructed based on the median values. The term one-dimensional refers to the fact that the window is processed on one dimension (the signal amplitude) as opposed to two dimensions in an image or a two-dimensional curve.

¹⁰ While BPM (i.e. beats per minute) is the measuring unit of the musical tempo, movements’ frequencies are here computed and referred to as “tempo” for convenience purposes.

Table 2: *Comparison of movements' tempo performed in silence depending on the study*

	Study One	Study Two		
Movement	(BPM)	(BPM)	t	p-value
Shoulder	46.6	47.7	0.67	0.675
Elbow	54.1	58.1	0.94	0.357
Knee	56.4	57.0	0.29	0.775
Tapping	109.4	102.4	0.14	0.889
Walking	92.9	94.0	0.32	0.751

3.3.3 Were participants influenced by the music starting, stopping or throughout the experiment?

To answer this question we focused on two particular moments in the recording session: the moment when the music started and when it stopped. In order to measure the influence of music on movements we computed three different indices: Music Starting, Music Stopping and Baseline-Silence Difference (shortened to B-S Difference). These indices represented the variation in movement tempo between two segments of interest (SOI). In order to measure this variation, we subtracted the movement tempo observed in the first SOI from the second SOI and divided that by the tempo of the first SOI and then multiplied it by 100. In other words, it corresponds to the variation in percentage of the first SOI from the first SOI to the second SOI.

The first index, Music Starting, was meant to determine if participants were influenced when music started. We thus calculated the variation in tempo between the baseline and the first 20s segment of music at 60 BPM (i.e. segment 2). Following the same idea, we measured the variation in tempo between the last 20s segment of music (i.e. segment 12) and the 1 minute silence period at the end of the experiment (Silence) to measure whether participants were influenced by the music stopping (i.e. Music Stopping). Finally, in order to measure the overall influence of music, we calculated the variation in tempo between Baseline and Silence segments (i.e. B-S Difference). This last index thus refers to the extent to which the music “carried” the movement of participants from the start (Baseline) to the end of the experiment (Silence). Relative and absolute values regarding these three indices are given in Table 3. Absolute variation values were calculated by taking the absolute difference in tempo between the first and second SOI instead of the relative difference. Relative values give an insight on the direction of the variation (deceleration or acceleration) while absolute values give an insight on the amplitude of the variation (regardless of the direction) of music on movements.

Table 3: Mean variation (%) across participants between movement tempi for the three indices

Movement	Relative variation (%)			Absolute variation (%)		
	Music Starting	Music Stopping	B-S Difference	Music Starting	Music Stopping	B-S Difference
Shoulder	0.43	-2.09 ^a	0.34	2.13 ^a	4.05 ^a	6.05 ^a
Elbow	0.47	0.57 ^a	1.61	3.01 ^a	4.57 ^a	9.94 ^{a,b}
Knee	0.25	-0.29 ^a	2.15*	0.84 ^a	2.40 ^{a,b}	2.55 ^{a,b}
Tapping	4.57	-9.21 ^b *	10.00	12.32 ^b	10.34 ^b	18.76 ^b

* different from 0 at $p < .05$. Letters (a,b) represent groups of values that are different from each other within each column at $p < .05$

We first wanted to determine if the relative values were different from zero (i.e. meaning no variation). This was tested using a one-sample t-test with zero as the reference. Because the absolute values are not normally distributed and always have a positive mean by definition, this test was not performed on absolute values. Results showed that for Music Starting, no value was different from zero ($p=.54$; $p=.68$; $p=.37$; $p=.41$ from Shoulder to Tapping, respectively). Regarding Music Stopping, only the Tapping task yielded relative values different from zero ($t=-3.00$, $p=.009$). The three other values were not different from zero ($p=.19$; $p=.69$; $p=.74$; from Shoulder to Knee, respectively). Finally, the only significant difference in tempo found between Baseline and Silence epochs (B-S Difference) was found in the Knee movement ($t=3.17$, $p=.006$). Taken together, these results suggest that during the Tapping task, participants consistently decelerated when music stopped. Furthermore, participants moved faster during the Silence epoch than during the Baseline epoch when performing the Knee movement.

We then wanted to know if these values were different from each other. To test that, we performed a repeated measure ANOVA for each index with Movement (Shoulder, Elbow, Knee, Tapping) as the only within-subject variable. We first analyzed the relative values. The Music Starting relative values were not different from each other ($F(3,42)=.54$; $p=.65$). However, the effect of Movement was significant for the Music Stopping relative values ($F(3,42)=6.34$; $p=.001$). Post-hoc (Bonferroni) analyses revealed that the Tapping task was different from Shoulder ($p=.04$), Elbow ($p=.001$) and Knee ($p=.005$). The three other movements were not different from each other ($p=1$). Furthermore, there was no effect of Movement for the B-S Difference index relative values ($F(3,42)=1.12$; $p=.34$).

The same analyses were performed for the absolute values. The repeated-measure ANOVA revealed an effect of Movement for the Music Starting index ($F(3,42)=5.3$; $p=.003$). Post-hoc (Bonferroni) also revealed that the tapping task was the most influenced movement and was different from the three other movements ($p=.017$; $p=.035$; $p=.005$ for Shoulder, Elbow and Knee respectively). Analyses also revealed a main effect of Movement for the Music Stopping absolute values ($F(3,42)=5.24$; $p=.003$). Post-hoc (Bonferroni) revealed that the Tapping task was different from the Shoulder ($p=.03$) and the Knee movement ($p=.003$). The tapping task was marginally different from the Elbow movement ($p=.059$). No other

differences were found. Regarding the B-S Difference, analyses showed a movement effect ($F(3,42)=4.14$; $p=.01$). However, Post-hoc (Bonferroni) only revealed that the Tapping task was different from the Knee movement ($p=.01$). The Tapping task was marginally different from the Shoulder movement ($p=.07$) but not from the Elbow movement ($p=.45$). No other differences were found.

To summarize, due to a great variability across participants, it was difficult to determine if participants were influenced by music throughout the experiment or by starting and stopping. However, it appeared that the tapping task was the most influenced by music. All the other movements were mostly not different from each other and were influenced by music to a lesser extent.

3.3.4 How did participants react throughout the experiment in terms of strategies?

As suggested in the previous section regarding the influence of music, quantitatively describing the participants' behavior is difficult as they behave differently and sometimes in opposite ways. Nonetheless, some participants expressed similar strategies or behavioral patterns in all movements in reaction to music starting and its increasing tempo. These strategies are referred to as "patterns".

The selection of the patterns was determined visually and quantitatively on the graphs representing the evolution of tempo through time for each movement and every participant. The first distinctive characteristic we looked for was whether the movement tempo was increasing, decreasing or not changing. The patterns were then chosen based on other characteristics such as their starting point, the number of segments involved, the musical target of the movement and the quantitative difference in tempo between segments. The starting point of the pattern might refer to the Baseline or anywhere else in the session. A particular case was made for Metrical Level as a starting point (see *Metrical Change* pattern below). The musical target refers to the apparent "target" that the participant is trying to reach through the expression of a pattern. The target might concern the current metrical level, a higher or lower metrical level. A table summarizing the different criteria associated with each pattern can be found in the Appendices.

The first pattern, referred to as "*Acceleration*" corresponds to an acceleration of the movement tempo when music was present (while not being synchronized). When participants accelerated over 3BPM in one segment or through the course of several segments (2-5), it was considered as "*Acceleration*". This threshold of 3 BPM was chosen because it was the objective increment in tempo associated with the lowest metrical level with which participants interacted (1:2). It was decided to consider >3 BPM accelerations over several segments as Acceleration patterns because the music had to have a stimulating effect on participants to incite them to accelerate past 3 BPM. The second pattern, "*Start Adaptation*", corresponds to the participant adapting his movement tempo when music starts. This adaptation might be a deceleration or an acceleration to get closer to a particular metrical level. This pattern only occurs after the Baseline segment. The third pattern, "*Adaptation*", corresponds to the participant adapting his movement tempo to come closer to the musical tempo or an equivalent metrical level. In other words, the participants decelerate to get closer to the perceived musical tempo. This deceleration might either be sudden when participants are

close to the musical tempo or subtle and lasting for several segments when they start far away from the musical tempo or equivalent metrical level. Contrary to the *Start Adaptation* pattern, it does not occur immediately after the Baseline and typically occurs later in the session. The fourth pattern, “*Metrical Change*”, corresponds to a participant changing his movement tempo from one metrical level to another. That is., the participant divides his movement tempo by a factor of two in a few segments to come closer to a lower metrical level. The fifth pattern, “*Limit Reached*” corresponds to a participant reaching the highest tempo for the session and immediately decelerating afterward. The sixth pattern, referred to as “*Synchronization*” corresponds to a match between the participant’s movement and the musical tempo or an equivalent metrical level within 1 BPM from the musical tempo (as in Styns et al., 2007).

The seventh pattern, “*Stable*” corresponds to a short period of time when the movement tempo barely changed or did not change at all. This period of time is usually not longer than 6 consecutive segments. It was decided that accelerations below 3 BPM between two segments or through the course of several consecutive segments were considered as “*Stable*” patterns. This pattern is different from the next “*No Disruption*” pattern as it lasts for a shorter period of time. The eighth and last pattern, “*No Disruption*” corresponds to an inexistent influence of music on movement. This corresponds to the tempo of movement not changing over time during the whole recording session despite the musical tempo increasing. This category is the only one that excludes other categories as only participants that do not show any disruption during the whole session fall in this category.

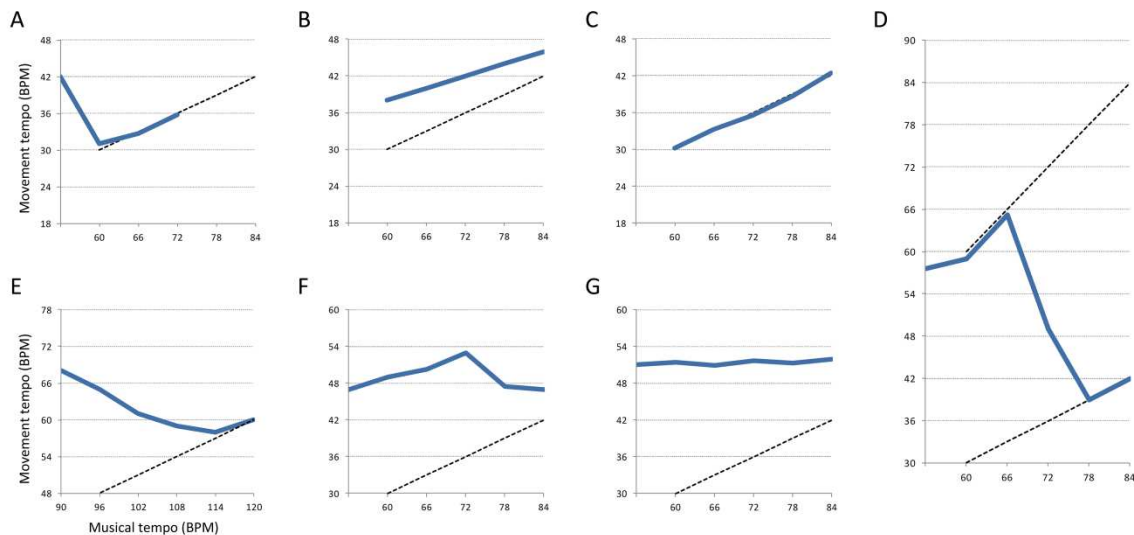


Figure 3. Examples of behavioral patterns found in the experiment. Thick blue lines represent the evolution of the movement tempo from segment to segment. Dotted lines represent a perfect match between musical and movement tempo according to a certain metrical level. The represented patterns are the following: **(A)** Start Adaptation, **(B)** Acceleration, **(C)** Synchronization, **(D)** Metrical Change, **(E)** Adaptation, **(F)** Limit Reached, **(G)** Stable. The pattern “*No Disruption*” is not represented here because it corresponds to a flat line during the whole experiment.

An example of each pattern can be found in Figure 3. Thick blue lines represent the behavior of a hypothetical participant expressing a specific pattern. Dotted lines represent a perfect match between movements and musical tempo according to a certain metrical level.

The number of participants expressing each behavioral pattern can be found in Table 4. Regarding the *Start Adaptation* pattern, the first number in parenthesis corresponds to an acceleration when music starts and the second number to a deceleration when music starts. Note that synchronizations are reported as the number of participants synchronizing at some point and the number in parenthesis corresponds to the total number of synchronization occurrences for a movement. Ultimately, dividing the number of synchronization occurrences by the number of participants gives us the average number of segments during which participants synchronized. It is noteworthy that these segments might not be consecutive as participants can sometimes desynchronize with music before re-synchronizing.

The different patterns found in participants can be summarized as being indicative of the influence of music on movement or to the contrary, the lack of influence. The first six patterns are synonym of influence while the last two tend to express a lack of influence (see above and below dotted line in Table 4, respectively). Generally speaking, movements tend to show the same organization as in the previous analysis. Namely, the tapping task and the elbow joint movement are the most influenced by music. Shoulder joint movement is influenced to a lesser extent while knee joint movement was hardly influenced by music (seven out of 15 participants were not influenced by the music at all).

Table 4 also gives us information on the number of participants that synchronized with music at some point. As seen above, participants did synchronize with the music on rare occasions. The movement organization follows the same as previously found. Namely, synchronizations were more often observed in the tapping task and in the elbow joint movement.

During the Shoulder movement, participants synchronized on average 4.8% (± 6.9) above their baseline (min -9%, max 15%). For the Elbow movement, participants synchronized on average 3.4% (± 12.9) below their baseline (min -41%, max 20%). On average, participants synchronized 1.8% (± 3.5) above their baseline during the Knee movement (min -6.5%, max 7%). Finally, participants that synchronized in the tapping task did so 14.8% (± 32.5) above their baseline (min -25%, max 125%). The case of the Tapping task is particular as many participants synchronized with music during an average of 4 segments; participants increased their tempo significantly in relation to their baseline, leading to higher percentages above their baseline.

To summarize, participants who synchronized did so in a 3-15% zone around their baseline, mostly above it. Synchronizations typically occurred after the *Start Adaptation*, *Adaptation* and *Metrical Change* patterns, suggesting an attraction of the music on movement. Furthermore, synchronizations also occurred after *Stable* patterns, suggesting that participants were not influenced until their movement tempo was close to the music tempo.

Table 4: Number of participants expressing a specific behavioral pattern during a recording session for each movement.

Pattern	Movement			
	Shoulder	Elbow	Knee	Tapping
Acceleration	6	10	5	13
Start Adaptation	0	5 (2/3)	0	9 (4/5)
Adaptation	5	3	2	8
Metrical Change	0	1	0	5
Limit Reached	3	5	3	7
Synchronization	10 (11)	13 (22)	9 (12)	13 (52)
Stable	10	9	7	5
No Disruption	4	0	7	0

Numbers in parenthesis for the Start Adaptation pattern correspond to the number of participants accelerating/decelerating when music started, respectively. Numbers in parenthesis for the Synchronization pattern correspond to the total number of segments during which participants synchronized.

Interestingly, participants behaved differently depending on their baseline tempo when music started. This was observed in the form of Start Adaptation patterns in the Elbow and Tapping tasks. For example, in the Elbow movement, participants that had a Baseline at around 55 BPM and below tended to decelerate toward a 1:2 metrical level (i.e. perceiving one beat every two beats). All the participants above this threshold interacted with music at a 1:1 metrical level at some point in the session. Participants with a Baseline around 75 BPM decelerated toward the 1:1 metrical level when music started. A similar behaviour was observed in the tapping task with a threshold situated around the middle of two metrical levels. For example, most participants that moved at around 90 BPM or above synchronized immediately with the 2:1 metrical level when the music started. Participants that moved at a lower tempo during the Baseline interacted with the 1:1 metrical level, mostly expressing *Start Adaptation* and *Synchronization* with music within a few segments. Participants under 60 BPM interacted with the 1:2 metrical level. This would suggest that there is a threshold that determines the metrical level with which participants tend to interact.

3.3.5 How did participants subjectively rate different moments in the experiment?

Participants reported music being “too fast” or “too slow” as being unpleasant and difficult when performing oscillatory movements and the tapping task. Furthermore, some participants rated epochs without music (Baseline and Silence) as more pleasant than the rest of the session because of the absence of interferences on their movements. The *Metrical Change* and *Limit Reached* patterns were associated with unpleasant ratings as movements could not keep up with the music. Overall, synchronizations were associated with pleasant ratings.

3.4 Discussion

We investigated how the perception of rhythmic music influenced self-paced movements. Our focus was to unveil the basic mechanisms of entrainment to music through the interaction between motor resonance and motor constraints. In other words, we tried to uncover how motor resonance with music might influence self paced oscillatory movements using different limbs.

The data we collected are intricate. In order to understand what happened during the experiment, based on four different notable moments during each recording session, we computed three indices: Music Starting (Baseline/Second Segment comparison), Music Stopping (Twelfth Segment/Silence comparison) and Baseline-Silence Difference (Baseline/Silence comparison). These three indices gave us information on how different movements were influenced by the appearance and disappearance of a musical pulse. Overall, we found that all movements were influenced by these events to some extent but the direction of this effect was not consistent (i.e. relative values). This was most likely due to participants behaving in complex and sometimes opposing ways, leading to an absence of a clear effect. The only consistent data point was that participants in the tapping task decelerated when the music stopped by about 10% of their tempo in the last music segment. This deceleration was most striking when participants synchronized with music during the last segment. The sudden absence of the musical pulse most likely led participants to go back to a more comfortable pace. This result is in line with Yu, Russell and Sternad's (2003) who found a drift toward the preferred movement tempo when the auditory cue disappeared in a continuation task. When entrainment stopped (i.e. having nothing to resonate to), we could argue that the motor constraints took over and led participants to move closer to their baseline tempo (i.e. resonant frequency).

The tapping task was consistently more affected by the music than other movements. This distinction between the tapping task and other movements is relevant if we consider the different timing mechanisms involved in producing these rhythmical movements. Tapping is an event-based task (Delignières, Lemoine, & Torre, 2004, see Repp, 2005 for a review on tapping) while genuine pendulum-like oscillatory movements are more likely based on spinal CPGs, sending alternating pulses to antagonist muscle groups. Finding greater entrainment in the tapping task suggests that music affected event-based movements to a greater extent than oscillatory movements. We could thus argue that taps were more influenced than oscillatory movements because they rely on the onset of a precise event for the movement to be performed. In the same sense that Naveda & Leman (2010) showed that dance movements were represented in a spatio-temporal format based on the musical beat, taps were more likely to entrain with music due to their event-based nature. This explanation is further supported by the fact that the elbow movement was somewhat more influenced by music than the two more genuine oscillatory movements. Moving the elbow most likely required much more cortical involvement and relied to a lesser extent on CPGs. We could further argue that the other movements were least sensitive to the musical pulse because they do not depend on event-based timing mechanisms. In the absence of a "target" in space and time (e.g. Naveda &

Leman, 2010), oscillatory movements were less likely to entrain with music. We could imagine that if participants had performed typical, more ecological dance movements with music, they might have been more influenced by the event-based nature of these dance movements. This particular issue needs to be investigated in further research.

To further understand the strategies put in place by participants to cope with the task, we analyzed the shared behavioural patterns expressed by participants in all movements. The eight patterns described were indicative of either an influence of music on movements or no influence of music on movements. We argue that most of these patterns were performed depending on how the musical tempo was perceived. More precisely, we argue that it was the mismatch between the participant's movement tempo and the perceived musical tempo that led to these patterns. The fundamental assumption would be that participants' movements were attracted to whichever metrical level they were perceiving. The most striking example of this was found in the *Adaptation*, *Start Adaptation* and *Metrical Change* patterns. Namely, participants either slowed down or accelerated their movements toward a high or lower metrical level (despite the increasing tempo). When music was perceived as faster than their movements, participants were more likely to accelerate. Contrariwise, when it was perceived as being slower than their movements, participants were more likely to slow down. The case of *Metrical Change* is possibly the expression of the motor constraints the participants had to deal with. When the music was too fast for them, they changed their perception of the metrical level and slowed down accordingly. These participants usually synchronized with music after halving their movement frequency, giving further support to the perception account.

As suggested above, the relationship between action and perception can go both ways. Much like Toiviainen et al. (2010) who showed that different parts of the body resonated to different metrical levels, we could argue that participants perceived the music's metrical level depending on the capacity offered by the limb used (i.e. perceptual resonance). This would also be in accordance with Moelants' (2002) suggestion that music perception relies on a perceptual resonance phenomenon. Namely, he established a parallel between the most perceived and represented musical pulse in western dance music (120BPM) and the frequency at which the motor system seems to be tuned (2Hz or 120BM; MacDougall & Moore, 2005). Styns et al. (2007) and Leman et al. (2013) also suggested that walking synchronized with music was the most accurate when the musical tempo was around 120BPM. In a way, this would also give support to the notion of musical affordances suggesting that music perception relies on motor processes. Furthermore, it would support the idea that motor potentialities in the music should be perceived depending on the capabilities of the motor system. Accordingly, in our experiment, we observed that participants behaved differently depending on their baseline movement tempo when music started. We could thus argue that movements that were performed in silence (before music started) ultimately determined how music was perceived (perceptual resonance), which would have, in turn, determined how participants moved (motor resonance). These observations would thus suggest that participants' resonant frequency might have determined how they perceived the metrical level, leading to their movements adapting to it through motor resonance. In other words, participants might have found in the musical stream the features (i.e. a specific tempo/metrical level) that would allow

them to move along to it (i.e. musical affordances). This would be in line with Todd et al. (2007) study that suggested that the perception of musical rhythms might be shaped by the anthropometric factors influencing the natural movement tempo of the individual. Very recently, Dahl et al. (2014) also suggested that music perception or rather preferred beat rate was dictated by body morphology.

Interestingly, participants sometimes were not influenced by music at all. A first explanation could be that participants were focusing exclusively on their movement while paying no attention to the music. This explanation does not hold as we have found these patterns mostly in two movements and not in the others. There must be something else than attentional focus if participants were not able to ignore the music during other specific movements. Therefore, another possibility could be that participants' movements were too slow or too fast to entrain with a specific tempo or equivalent metrical level. In other words, movements were not attracted toward the musical tempo because they were "too far" from it. One way to explain this lack of influence is to consider the specific limbs that represent the *Stable* and *No Disruption* patterns the most: Knee and Shoulder movements. Like previously suggested, their lower sensitivity to background rhythmic music might come from their greater reliance on spinal timing mechanisms meaning they were more finely tuned to an optimal frequency. Furthermore, compared to the two other movements, the lower leg and the whole arm have a far greater inertia. In that sense, it may have required too much effort and energy to deviate from the optimal functioning tempo, going against the "natural" aspect of the required movements. Thus, the motor constraints were probably too strong to overcome. Participants were thus not inclined to accelerate or decelerate their movement tempo in response to music. Furthermore, we could argue that the motor constraints effectively constrained the range within which music was attractive (motor resonance) as synchronization was observed nevertheless during these movements. More precisely, they changed the phase of their movements to be in accordance with the musical pulse when the musical tempo was matching their movement tempo.

Regarding the *Stable* patterns, we could also argue that they were due to the motor constraints not allowing any kind of interaction with music, like it was suggested for Knee and Shoulder movements. However, as they were found in every movement, we cannot exclusively rely on the limb-specific motor constraints explanation. Therefore, we argue that these patterns are a more specific expression of a too great distance between the actual movement and the musical tempo. It is possible that participants managed to inhibit listening to music during these short periods of time but when the musical tempo was closer to the actual movement again, it had an effect on their movements. We could see that as participants "waiting" for the music to become attractive again or maintaining a comfortable tempo as the tempo could not be followed anymore (i.e. the lower metrical level being too far away). At this point, decelerating or accelerating would have required too much energy.

Like Demos et al. (2010), we also found occurrences of synchronization between the participants' movements and the musical tempo. This would suggest that spontaneous entrainment to a background music can occur when attention is not specifically devoted to the music. The fact that participants synchronized is relevant to the assumption that music perception is intrinsically linked to movement. Even more relevant to our motor constraint

hypothesis, synchronizations were only found within a 3-15% range around the preferred movement tempo. This zone is in line with what Repp (2006) found in a tapping-continuation task with audio distractors. More precisely, he found that audio distractors were only effective when their tempo was around 10% of the tempo that participants had to reproduce without any auditory cues. Our results further suggested that resonant frequencies are most sensitive to entrainment (as opposed to interference) within a similar range. In our experiment, it was the synchronizations that lasted for extended periods of time in the tapping task that led to this higher range. Musical tempo that was too fast or too slow compared to the movement baseline (resonant frequency) would not lead to synchronization. A particular case can be made of the tapping task as most participants synchronized with the music for extended periods of time. Furthermore, synchronizations even occurred after “*Stable*” patterns, further suggesting that participants were not influenced by music until their movement tempo was close to the musical tempo. In the end, we could argue that participants synchronized with music when it was easy enough or when their movements were close enough to the musical tempo.

Participants were also asked to verbally rate pleasant and unpleasant moments inside each recording session. Moments when participants felt a match between their movements and the music were consistently associated with pleasantness. Moments when participants felt that the music was too slow, too fast were associated with unpleasant ratings. These ratings are in line with the general assumption that “being in the groove” is a pleasant experience (e.g. Janata et al., 2012). Although participants were not instructed to attend the music, one can argue that their ratings suggest that they paid attention to it. Participants were not instructed to do anything special about the music. The fact that participants reported music being “too fast” or “too slow” is indicative that the participants perceived a mismatch between their movements and the music. It can also be indicative that, from a more auditory point of view, participants evaluated fast and slow music as unpleasant to hear. In any case, it would mean that participants could not refrain from attending music and being influenced by it. This further suggests that the spontaneous perception of music (as opposed to listening to it) interacts with ongoing movements. We note that our participants were not specifically instructed to suppress hearing the music. We might imagine that they processed and listened to it, even if they did not explicitly use the music to influence their movements, in line with our instructions.

4. General discussion

Our results suggest that music influences movements differently depending on the limb used. The only distinction we found between the different limbs was that the most influenced rhythmic movement was consistently the tapping task and to a lesser extent the elbow movement. The two other movements were almost never influenced by music. We argue that the information extracted from hearing music in the background (the beat) is similar in nature to event-based motor information (taps); the musical pulse is processed in a motoric fashion. This is in line with neuroimaging studies that suggest that rhythms and beats are processed in the motor system (e.g. Grahn & Brett, 2007; Stupacher et al. 2013). This is also in line with Naveda and Leman’s (2010) work on dancers. They showed that synchronizing with music involved event-based movements that were based on periodicities

of two beats, suggesting that movements were performed according to goals defined in space and time. In our experiment, the participants' task was not to synchronize with music and we still found most synchronization in the most event-based movement. In that sense, it might have been more attractive for participants to synchronize with music due to the nature of the tapping task.

In line with the recent embodied music cognition literature, our study gives support to the notion that music perception is processed in a motoric fashion. As such, it can interfere with ongoing movement but mostly with movements that involve event-based timing mechanisms. To our knowledge, this study is the first to examine spontaneous entrainment to music in such detail. The present research provides experimental data on how music can afford movement depending on motor capabilities of different limbs. In line with Gibson's view on affordances (1979) and the literature on musical affordances (e.g. Godøy, 2009, 2010), we tended to show that movements were tuned to, or at least influenced by, the perception of music. We further suggested that the resonant frequency of limbs was an important factor to consider if we want to understand entrainment to music. In that sense, in line with the literature on the concept of groove, we suggest that a match between musical features and motor capabilities is associated with pleasant feelings and a tendency to be influenced by music to a greater extent.

Limitations of the present study might consist of movements not being ecological enough to relate to dance movements and music. Finger tapping is one of the most common ways through which people interact with music and might be used to spontaneously embody the musical pulse (Su, Pöppel, 2012). The three other movements that were chosen were relevant to our biomechanical constraints hypothesis but might not have been the most appropriate to investigate the impact of music. In that sense, we could assume that asking participants to perform typical rhythmic dance movements (e.g. Toiviainen et al., 2010 or Naveda, & Leman, 2010) rather than genuine pendular oscillatory movements would have lead to different results. Namely, it is very likely that we would have observed more synchronization and entrainment to music with more realistic movements. This particular issue should be studied in further research. Another limitation of the study might have been the choice of the musical material. Although they were created with a control on tempo in mind, the different instrumental loops in each song (reflecting different genres) might have had an unsuspected specific effect on movements. As Burger et al. (2013) and Leman et al. (2013) have suggested, certain musical features related to timbre and rhythms (e.g. pulse clarity) have a specific impact on music-induced movements. Moreover, studies on the musical groove have also looked into the musical features that would induce an urge to move along to music (e.g. Madison, Gouyon, Ullén, & Hörnström, 2011) and found that beat salience as well as the metrical density were critical.

Future research should investigate the individual factors involved in the different behaviors observed. Namely, it would be of great interest to investigate why certain participants were more sensitive to musical rhythms while others were not. Investigating their dance habits and musical experience might give us insights as to why some participants were more influenced by music than others. Future work on the influence of music on movement should also examine the notion of groove which suggests a close match between motor

capabilities and its implication on music-induced movements. In addition, future research should also look into the implications of this tendency to move on music in rehabilitations for example. A better understanding of how music and particularly its rhythmical features can evoke movement seems essential.

Discussion générale

Ce travail de thèse avait pour objectif d'étudier le lien réciproque qu'entretiennent la musique et le mouvement à travers la production de mouvements induits par la musique. Plus particulièrement, il était question d'étudier leur implication sur la cognition et les mécanismes cognitifs et moteurs qui sous-tendent leur production. L'ensemble des résultats obtenus est discuté ci-dessous à la lumière de la littérature sur la cognition incarnée, le couplage perception-action et les affordances musicales. Cette discussion générale suit le raisonnement initialement proposé en répondant aux différentes questions posées dans l'introduction théorique.

Quelle influence exercent les mouvements induits par la musique sur la cognition musicale?

Dans une première partie, nous avons examiné l'influence de ces mouvements spontanément produits en musique sur la cognition musicale. Plus précisément, nous avons suggéré que ceux-ci pouvaient avoir un effet bénéfique sur la mémorisation de matériel musical nouveau. Dans deux études différentes, nous avons examiné le potentiel bénéfique de mouvements produits en rythme avec la musique sur sa mémorisation (Etude 1) et également sur la rétention de son contexte d'encodage (Etude 2).

Contrairement à nos hypothèses, nous n'avons pas obtenu de meilleures performances pour les participants ayant bougé en rythme avec la musique. Dans la première étude, les participants ayant écouté la musique sans bouger ont obtenu des performances de reconnaissances supérieures à tous les autres groupes ayant bougés en musique. Dans la deuxième étude, aucune différence significative n'a été trouvée en termes de performances mnésiques entre une tâche d'écoute simple et une tâche motrice (i.e. bouger en rythme) selon un design intra-sujet.

Un deuxième objectif de la première étude était d'examiner l'influence de certaines caractéristiques musicales sur la rétention spécifique de certains morceaux. Dans ce sens, nous avons fait l'hypothèse que focaliser l'attention des participants sur l'ambiance (le Groove) ou l'instrumentation d'un morceau lors d'une tâche motrice allait permettre de meilleures performances mnésiques sur la reconnaissance de morceaux différents (plus de rejets corrects et moins de fausses alarmes). Cette hypothèse n'a été vérifiée qu'à moitié car nous avons obtenu un effet principal du type de variation et non une interaction spécifique entre la tâche du participant et les caractéristiques musicales. En effet, nous avons observé des taux de rejet correct plus élevés et des taux de fausse alarme moins élevés pour les paires de morceaux cible-distracteur dont le Groove variait entre la phase d'encodage et de test. Lorsque les morceaux à l'intérieur d'une paire cible-distracteur différaient en termes d'instrumentation uniquement, ces morceaux étaient plus souvent confondus, donnant lieu à un taux de fausses alarmes plus élevé. En somme, le Groove comme nous l'avons défini semble être une caractéristique musicale importante dans la différenciation entre deux morceaux.

Dans la deuxième étude, des résultats similaires ont été obtenus concernant la différence perçue par les participants dans les mouvements évoqués par les paires cible-distracteur. Dans un post-test, la tâche des participants était d'évaluer à quel point les mouvements évoqués par les deux extraits d'une paire cible-distracteur étaient différents. Nous avons dès lors observé une corrélation entre la différence perçue dans les mouvements évoqués et les performances mnésiques sur les morceaux nouveaux (rejets corrects et fausses alarmes). Les participants avaient moins tendance à considérer un nouveau morceau comme ancien (fausse alarme) lorsque celui-ci évoquait des mouvements différents par rapport au morceau cible. Lorsque les mouvements évoqués étaient semblables, les morceaux nouveaux étaient plus facilement considérés comme anciens.

Bouger en musique améliore-t-il la mémorisation d'un morceau ?

Nos résultats ont, de manière surprenante, démontré un effet contraire à nos attentes. En effet, nous avons observé de meilleures performances chez les participants à qui il était demandé de rester immobile pendant l'encodage.

Dans un premier temps, une explication simple à ces résultats consisterait à considérer la tâche motrice comme étant une "double-tâche" (Pashler, 1984). Les participants devaient dès lors rechercher dans le flux musical les différentes caractéristiques musicales permettant d'effectuer leur tâche tout en essayant de retenir les morceaux de musique. Ils auraient divisé leur attention sur les tâches ou auraient favorisé l'une par rapport à l'autre. Au contraire, les participants à qui il était simplement demandé d'écouter n'avaient qu'une seule tâche à réaliser. Un résultat qui invalide cette explication est le score obtenu par les danseurs experts. De par leur plus grande connaissance et aisance à associer un mouvement à de la musique (qui a été mesurée et confirmée dans leur évaluation de la « danse-abilité » des morceaux), les experts danseurs auraient du avoir plus de facilité dans la tâche motrice. Cependant, ils ont obtenu des scores de reconnaissance similaires aux novices et donc inférieurs aux participants ayant simplement écouté. Si la tâche avait été une "double-tâche", les experts auraient du obtenir de meilleures performances mnésiques, ce qui n'a pas été observé. Les experts ayant obtenus un score identique aux autres groupes de danseurs, il est donc nécessaire d'examiner en quoi les groupes de novices et les experts sont semblables face à la tâche.

Ainsi, une autre explication peut être que les participants ayant simplement écouté la musique ont créé des représentations de chaque morceau plus complexes que les participants qui ont bougé sur la musique. Lorsqu'il était demandé aux participants de bouger en rythme avec la musique (i.e. danseurs experts, novices et les imitateurs), ceux-ci ont dès lors cherché dans le flux musical des informations perceptives permettant de réaliser la tâche. Les danseurs ont basés leurs mouvement sur des informations rythmiques et dynamiques présents dans le morceau qui leur permettaient de bouger sur la musique (i.e. affordances musicales). De la même manière, les imitateurs ont basés leurs mouvement sur des indices perceptifs relatifs à la source du son, c'est-à-dire les instruments de musique ainsi que les rythmes associés. Au final, selon les théories sur les affordances musicales, les mouvements des participants à qui il

était demandé de bouger en rythme avec la musique étaient accordés à la musique sans efforts particuliers (perception directe).

Au regard de nos résultats, nous suggérons donc que ce traitement purement perceptif de la musique serait principalement superficiel, représentant une faible profondeur de traitement (Craik et Tulving, 1975). Dans ce sens, les participants à qui il était demandé de bouger en musique ont traité la musique de manière superficielle. On peut également imaginer que les experts danseurs ont traités la musique de manière encore plus superficielle. Cette explication permettrait de comprendre pourquoi les participants ayant bougés ont obtenus des scores inférieurs aux participants n'ayant pas bougé. Nous suggérons également que les participants n'ayant pas bougé ont réalisés un traitement plus profond du matériel musical. Ainsi, ce qui aurait donné lieu à des performances supérieures dans la tâche d'écoute simple serait dès lors l'évaluation des morceaux selon leur agréabilité. En effet, évaluer le caractère agréable des morceaux auraient demandé aux participants de traiter chaque morceau en fonction de sa consonance, sa familiarité, son contenu émotionnel, de leur préférences musicales, d'un jugement esthétique et dans une certaine mesure, un jugement moteur. Ces traitements conceptuels et corporels auraient encouragés des traitements profonds et l'activation du concept du soi (*self*), connu pour augmenter les fonction mnésiques (Symon, & Johnson, 1997). Au contraire, en bougeant sur la musique, les participants auraient agi "sur le moment" et en basant leur réponses (motrices) sur des facteurs externes plutôt qu'internes (jugement d'agrabilité).

L'explication de nos résultats tiendrait donc dans le fait que les participants qui ont bougés sur la musique et ceux qui l'ont simplement écouté ont traité les stimuli musicaux de manière différente. Les participants qui ont bougés en rythme avec la musique se sont focalisés sur la succession des pulsations musicales (beats) et ont développé leurs mouvements sur ceux-ci. Les participants qui ont imité les différents instruments de musique ont quant à eux utilisés des indices perceptifs relatifs à la source des sons entendus et aux rythmes et variations associées. L'explication principale de nos résultats serait donc que les participants à qui il était demandé de bouger ont exprimé, par leurs mouvements, les affordances dans la musique afin d'effectuer leur tâche. La notion Gibsonienne d'affordance (1979) suggère que la perception et l'action sont mises en relation de manière directe sans intervention de représentation complexe. Dans un sens, les participants ayant bougés n'ont pas souffert de la tâche étant trop compliquée mais plutôt comme étant "trop facile". En d'autres termes, bouger sur la musique requiert l'utilisation de caractéristiques musicales superficielles et il en résulte un traitement du stimulus musical également superficiel, ne donnant pas lieu à un traitement profond. Comparativement, les participants ayant écouté ont accédé à des représentations plus complexes pour réaliser leur tâche d'évaluation.

Lié à cette explication, nous suggérons également que le caractère générique des connaissances écologiques liées à l'association d'un mouvement et d'un son n'a pas aidé à créer une représentation multimodale du morceau entendu. Comme le suggère Godøy et al. (2006a, 2006b), les schémas moteurs permettant de bouger sur la musique sont d'ordre génériques, permettant ainsi de s'adapter facilement à tout type de musique, pour autant que

les affordances puissent être perçues. Les structures musicales sur lesquels se basent ces mouvements étant communes à une majorité de morceaux musicaux, les mouvements produits sont dès lors très peu spécifiques. Ce caractère non spécifique n'aurait pas permis de créer un lien entre le matériel musical entendu et les mouvements produits. Une explication similaire a été avancée par Brown & Palmer (2012) concernant leurs résultats lors d'un apprentissage audiomoteur de nouveaux morceaux. En effet, ils ont montré que lorsque les participants entendaient la performance de quelqu'un d'autre lorsqu'ils jouaient un morceau (plutôt que leur performance), le bénéfice d'un apprentissage audio moteur disparaissait. Ce que ces résultats suggèrent donc est que pour qu'un lien entre musique et mouvement soit bénéfique à la mémorisation de matériel musical, un lien étroit doit exister entre la représentation motrice et auditive. Il est important de noter que l'expérience Brown & Palmer (2012) diffère de la nôtre dans le sens où elle implique une tâche de production musicale alors que nous nous plaçons ici du côté perceptif de la cognition musicale. Ainsi, les associations entre les mouvements produits dans l'expérience de Brown & Palmer (2012) étaient très solides. Chaque mouvement sur une touche du piano est associé à une note. En comparaison, dans notre tâche perceptive, étant donné le caractère spontané des mouvements produits en musique, cette association semble dès lors très faible. Comme l'ont montré Maes et Leman (2013), l'apprentissage systématique d'une chorégraphie peut tout de même avoir un effet sur la perception de la musique. Il s'agirait donc du caractère générique des mouvements spontanés produits en musique dans notre tâche de perception qui aurait également empêché la création d'une représentation multi-modale.

Pour résumer, dans cette première étude, les participants ayant bougé sur la musique n'ont pas profité d'un apprentissage audio-moteur de nouveaux morceaux de musique. Nous avons suggéré qu'une représentation multi-modale n'a pas été créée car les participants ayant bougés ont uniquement mis en œuvre une stratégie "sur le moment", sa basant sur les affordances de la musique pour réaliser leur tâche. En couplant la perception à l'action, les participants ont dès lors donné du sens à la tâche sans intervention de représentations mentales complexes, conformément aux théories sur les affordances musicales. Ce traitement du stimulus musical peut être considéré comme étant superficiel (Craik & Tulving 1975), donnant lieu à des performances mnésiques inférieures aux participants ayant utilisés des représentations de plus haut ordre pour évaluer l'agréabilité des morceaux entendus.

Notre deuxième expérience apporte également des résultats allant généralement dans ce sens. Cependant, aucune différence dans les performances mnésiques entre le fait de danser sur la musique et de simplement l'écouter n'a été trouvé. Il est dès lors difficile de se prononcer sur une absence de différence entre deux conditions expérimentales. Une tentative d'interprétation de ces résultats reste tout de même intéressante si l'on compare la première étude à cette deuxième étude, à titre spéculatif. Ainsi, une explication à ce résultat pourrait être que, comparativement à la première étude, aucun traitement cognitif de haut niveau n'a été demandé aux participants dans la tâche immobile. En effet, dans la première étude, une partie des résultats observés a été attribué au jugement de l'agréabilité du morceau entendu sous-tendu par l'accès à des concepts relatifs au soi (*self*) et à des traitements plus profonds que dans la tâche motrice. La différence critique semble donc se situer dans l'absence de cette

évaluation cognitive sur le matériel musical. En somme, cette interprétation permettrait d'expliquer en quoi la tâche d'écoute n'a pas donné lieu à un traitement du stimulus plus profond, comme c'était le cas dans l'expérience précédente.

Une interrogation subsiste concernant la similitude entre les deux tâches. Malgré deux tâches manifestement différentes, les résultats obtenus par les participants ont été semblables. Comme cela a été suggéré dans un certain nombre d'études sur le lien entre perception et action dans un contexte musical ou dans les affordances musicales, les stimuli musicaux seraient spontanément traités de manière motrice, indépendamment de la tâche (écoute, jugement ou moteur). L'explication suggérée ici tiendrait donc du fait que dans les deux tâches (motrice et écoute), les participants auraient traités le potentiel moteur des différents morceaux (affordances musicales) de manière spontanée. Dans ce sens, les deux tâches ont donné lieu à des traitements très similaires. On peut imaginer que lorsqu'il leur était demandé de danser sur la musique, les participants ont traités les aspects moteurs de manière "ouverte" alors que dans la tâche d'écoute ces traitements ont été réalisés de manière "couverte" (simulation mentale).

Malgré le caractère spéculatif de cette explication, les données de notre post-test tendent à la supporter. En effet, le post-test réalisé portait sur l'évaluation de la différence perçue dans les mouvements évoqués par les deux extraits à l'intérieur d'une paire cible-distracteur. Nous avons dès lors observé une corrélation entre la différence perçue et les performances mnésiques concernant les morceaux nouveaux (rejets corrects et fausses alarmes). Lorsque la différence perçue dans les mouvements évoqués était plus importante, le nombre d'erreur (FA) diminuait et le nombre de rejets corrects augmentait. Inversement, lorsque les morceaux évoquaient des mouvements similaires, les distracteurs étaient plus souvent considérés comme anciens (FA). Encore plus pertinent dans notre interprétation, cette corrélation s'est retrouvée dans les deux conditions: danse et écoute. En relation avec l'explication suggérée jusqu'ici, ces résultats suggéreraient que le potentiel moteur inhérent à un morceau (son affordance) soit un élément clé dans la distinction entre deux morceaux. Ce dernier résultat est en accord avec ce qui a été trouvé dans la première étude concernant les changements d'instrumentation et de groove. Ces résultats sont discutés plus loin, en réponse à la question correspondante.

Pour conclure, nos résultats tendent à montrer que bouger sur la musique de manière spontanée requiert l'expression des affordances musicales inhérentes à chaque morceau. L'implication de l'expression de ces affordances est un traitement superficiel et probablement générique du matériel musical où les participants cherchent uniquement les indices perceptifs (i.e. caractéristiques musicales superficielles) pour réaliser leur tâche. Notre première étude suggère qu'un traitement cognitif sur l'agréabilité d'un morceau donne lieu à un traitement plus profond du matériel musical que dans une tâche motrice. Une interrogation persiste cependant sur l'absence de différence entre une tâche motrice et d'écoute dans notre deuxième étude. L'explication proposée suggère un traitement similaire du potentiel moteur inhérent au matériel musical dans les deux tâches. Cette explication pourrait également être à la base des

résultats obtenus concernant les informations contextuelles lors de l'encodage de morceaux nouveaux.

Bouger en rythme sur la musique améliore-t-il la rétention d'informations contextuelles liées à l'encodage d'un morceau?

Cette question a été spécifiquement étudiée dans la deuxième étude que nous avons réalisée. Les résultats obtenus n'ont pas permis de différencier l'effet d'une condition particulière sur la rétention d'information contextuelles liées à l'épisode d'encodage. Cette absence de résultat est difficile, voire impossible à interpréter. Cependant, nous proposons une piste afin de donner une explication raisonnable à ce résultat en gardant à l'esprit que cet aspect de la mémoire musicale n'a jusqu'ici pas été étudié.

Comme suggéré précédemment, une absence de différence entre la tâche motrice et la tâche immobile pourrait s'expliquer en considérant qu'il existe un point commun entre les deux tâches. Ce point commun se trouverait dans le fait qu'il existerait un traitement moteur dans les deux tâches. Comme l'ont suggéré des études d'imagerie, les rythmes musicaux seraient spontanément traités de manière motrice dans le cerveau (e.g. Grahn, & Brett, 2007). Si l'on considère qu'un traitement moteur a eu lieu au niveau cérébral, des informations motrices liées au contexte d'encodage seraient autant présentes dans la tâche motrice que dans la tâche immobile. Lorsqu'il est demandé aux participants de retrouver le contexte d'encodage (dansé/pas dansé), il serait dès lors difficile de différencier les morceaux entendus lorsqu'il leur était demandé de danser de ceux qu'ils ont entendus en restant immobiles. Cette explication ne peut pas être soutenue par notre absence de différence mais les résultats obtenus lors du post-test tendent à donner raison à cette explication. De futures recherches restent nécessaires pour déterminer la véracité de cette interprétation. Il est notamment important de cerner les différences et surtout les similitudes d'activation cérébrales motrices et prémotrices dans le traitement d'un morceau de musique lorsqu'il est simplement écouté et lorsqu'un individu bouge en rythme avec celui-ci.

Une deuxième variable de contexte d'encodage a été utilisée : l'espace. De la même manière, aucune différence n'a été observée entre un encodage dans une partie de la salle et une autre (gauche/droite). Danser sur la musique n'a pas augmenté la rétention de l'information sur l'espace d'encodage. Il est possible que cette information spatiale n'ait pas été pertinente par rapport à la tâche pour faire l'objet d'une rétention spécifique.

Focaliser l'attention des participants sur la production de mouvements liés à certaines caractéristiques musicales améliore-t-il la reconnaissance spécifique de certains morceaux ?

Notre deuxième hypothèse concernant les mouvements induits par la musique était leur spécificité quant à la représentation corporelle de certaines caractéristiques musicales. En effet, en se focalisant sur des caractéristiques musicales différentes, les participants mettent en œuvre des mouvements différents dans les tâches motrices. Ainsi, demander aux participants de danser sur la musique focalise leur attention sur la pulsation musicale, le rythme et les

changements de dynamiques. Demander aux participants d'imiter les instruments focalise leur attention sur l'instrumentation. Notre hypothèse était dès lors que cette focalisation sur un aspect de la musique plutôt qu'un autre permettrait la création d'une représentation mentale du morceau dont certaines caractéristiques musicales seraient plus saillantes que d'autres. Ainsi, les participants dansant sur la musique auraient eu plus de facilité à identifier un morceau comme nouveau (RC) dans la phase de test si celui-ci évoquait des mouvements de danse différents que le morceau cible. De la même manière, un nouveau morceau dont l'instrumentation diffère du morceau cible serait plus facilement identifié comme tel.

Nos résultats à ce sujet dans notre première étude n'ont pas montré d'effet spécifique de cette manipulation ; aucune interaction entre tâche et type de changement n'a été observée. Cependant, nous avons trouvé un effet principal du type de changement (instrumentation/groove). Plus précisément, nous avons observé un plus grand nombre de fausses alarmes et moins de rejets corrects lorsque les paires cible-distracteur étaient caractérisés par un changement d'instrumentation. Critique pour notre argument, ce changement d'instrumentation implique également un groove identique entre les morceaux d'une paire cible-distracteur. Ainsi, la dynamique et le tempo du morceau restent identiques mais il est joué avec d'autres instruments. Lié à ce résultat, nous avons également observé que les morceaux (d'une paire cible-distracteur) dont le groove différait étaient plus facilement identifiés comme étant nouveaux. Ces résultats suggèrent dès lors que les changements de groove permettent de mieux différencier deux morceaux à l'intérieur d'une paire cible-distracteur. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Halpren et Müllensiefen (2008) et Trainor, Wu et Tsang (2004) concernant les caractéristiques musicales encodées en mémoire. Ces auteurs ont suggéré que le tempo musical d'un morceau était spécifiquement encodé et qu'une modification de celui-ci dans la phase de test entraînait plus d'oublis (i.e. omission).

Dans notre deuxième étude nous avons également testé cette hypothèse de manière un peu différente. A la fin du test de mémoire, les participants ont été invité à évaluer la différence perçue dans les mouvements évoqués par les deux morceaux à l'intérieur d'une paire cible-distracteur. Ainsi, les participants ont évalué à quel point les morceaux à l'intérieur d'une paire évoquaient des mouvements différents. Contrairement à l'expérience précédente, aucune distinction n'a été faite entre des mouvements relatifs aux instruments et des mouvements relatifs au groove musical, aucun détail n'a été spécifié quant aux mouvements évoqués.

Nos résultats ont montré que cette évaluation était corrélée avec les performances mnésiques concernant les morceaux nouveaux (rejets corrects et fausses alarmes). Plus précisément, nous avons observé une corrélation positive entre la différence perçue et le taux de rejets corrects des morceaux nouveaux. A l'inverse, nous avons observé une corrélation négative entre cette évaluation et les fausses alarmes. Ce que ces résultats suggèrent est qu'une différence plus grande perçue dans les mouvements évoqués entre les deux morceaux d'une paire cible-distracteur donne lieu à une meilleure identification de morceaux nouveaux comme tel. Ainsi, conformément à l'étude précédente, un changement "d'affordance musicale" permettrait de différencier deux morceaux similaires plus facilement. Il est cependant

important de noter qu'aucune spécificité n'a été demandé quant aux mouvements évoqués, comme cela a été le cas dans l'étude précédente. Ainsi, une différence dans les mouvements évoqués peut très bien faire référence à des mouvements de danse ou à des mouvements d'instrumentation. De manière intéressante, cet effet a été observé aussi bien lorsque les participants ont dansé sur la musique que lorsqu'ils sont restés immobiles. Ceci suggère dès lors que le potentiel moteur inhérent à un morceau (son affordance musicale) serait un élément essentiel au traitement de celui-ci, peu importe la tâche qui est demandé, qu'elle soit motrice ou non.

Une autre explication à ces résultats pourrait également être que la distinction entre les morceaux ne s'est pas réalisée sur base du potentiel moteur mesuré dans le post-test mais plus simplement sur une différence acoustique entre les morceaux. Le jugement de différence de mouvements évoqués pourrait dès lors être le reflet d'un traitement purement acoustique des morceaux. Cette explication permet également d'expliquer le fait que cette corrélation se retrouve aussi bien dans la tâche motrice que dans la tâche immobile. Cette explication devra être le sujet de futures recherches.

Quelle influence exercent les rythmes musicaux sur la production de mouvements rythmiques spontanés?

Dans une deuxième partie de la thèse, nous avons examiné comment la perception musicale influençait la production de mouvements rythmiques. Plus précisément, nous voulions étudier les mécanismes de résonance motrice impliqués dans la perception musicale. Nous avons dès lors opposé cette résonance motrice à des contraintes motrices qui brident et stabilisent le fonctionnement moteur des membres du corps. En d'autres termes, nous avons opposés le caractère rythmique de mouvements d'oscillations au caractère rythmique de la musique perçue. Les résultats de la troisième étude se sont révélés intéressants à plusieurs égards. Premièrement, nous avons mis en évidence le caractère hiérarchique de l'organisation des périodes d'oscillations des membres du corps selon leur caractère proximal/distal. Lié à ce résultat, l'hypothèse principale de cette troisième étude concernait l'influence différentielle de la musique rythmique sur les mouvements d'oscillation. Plus précisément, nous avons émis l'hypothèse que les différents membres du corps, caractérisés par différentes fréquences de résonance, allaient être influencés différemment par la musique rythmique. Afin d'accommoder pour les différentes fréquences de résonance des différents participants, nous avons opté pour des stimuli musicaux dont le tempo augmentait par incrément. Ceci a également permis d'étudier l'influence de la musique rythmique sur les mouvements de manière dynamique.

Les résultats de cette troisième étude ont montré une influence différente de la musique rythmique sur les différents mouvements utilisés (i.e. différents membres). Le mouvement de tapping a été, de manière consistante, le plus influencé par la musique. Les autres mouvements rythmiques ont été beaucoup moins influencés par la musique, voire pas du tout. Un autre aspect étudié était les différentes stratégies mises en place par les participants lors de la tâche. Au total, huit stratégies différentes ont été mises en évidence et

expriment généralement la perception d'une compatibilité ou au contraire, d'une incompatibilité entre les mouvements des participants et le tempo musical. Ici encore, la tâche de tapping mais également le mouvement du coude ont donné lieu à l'expression du plus grand nombre de stratégies indicatives d'une influence de la musique sur le mouvement. Les mouvements d'oscillations plus « purs » (i.e. bras entier et jambe) ont quant à eux donné lieu au plus grand nombre de patterns comportementaux indicatifs d'une absence d'influence de la musique sur le mouvement.

Finalement, il a été demandé aux participants d'évaluer les moments plaisants et déplaisants dans chaque session pour chaque mouvement. Nous avons généralement observé des évaluations plus positives pour les moments où le tempo musical et le mouvement du participant étaient compatibles. À l'inverse, une incompatibilité entre le tempo musical et le mouvement du participant a donné lieu des évaluations négatives.

Comment sont organisés les mouvements rythmiques d'oscillation produits spontanément?

Nous avons observés des résultats montrant que les mouvements d'oscillation des membres sont organisés de façon hiérarchique, donnant raison à une explication biomécanique des mouvements rythmiques. De manière intéressante, les membres plus proximaux partageaient une fréquence d'oscillation similaire suggérant des contraintes similaires malgré des différences anatomiques et physiques évidentes. Cette observation prend tout son sens lorsqu'on compare la fréquence de marche des participants à la fréquence d'oscillation de leur bras et jambe; ces trois fréquences d'oscillation sont similaires. Ce que ces résultats suggèrent est donc qu'au delà de contraintes mécaniques appliquées aux différents membres du corps, certaines contraintes fonctionnelles pourraient également entrer en jeu. Ainsi, on pourrait imaginer que les mouvements d'oscillation de la jambe entière et du bras entier sont reliés dans le sens où ils rentrent en synchronie (anti-phase) lors de la marche. La marche serait dès lors le facteur commun qui donnerait lieu à des fréquences similaires hors d'un contexte de marche. Ce résultat est en accord avec l'étude de MacDougall et Moore (2005) sur les déterminants de la fréquence de marche. Ils ont en effet montré que les paramètres anthropométriques des participants ne jouaient pas de rôle dans leur fréquence de marche qui se situait en moyenne autour de 2 Hz. Cette fréquence de 2 Hz se retrouve également dans le domaine musicale où le tempo musical le plus représenté se situe autour de 120 BPM. Ce tempo spontané de marche est également présent dans les tâches de tapping spontané (e.g. Fraisse, 1982; Moelants, 2002; Styns et al. 2007).

Comment interagissent les mouvements rythmiques d'oscillation produits spontanément et la pulsation musicale?

Afin de répondre à cette question, plusieurs analyses ont été réalisées et ont donné lieu à des résultats allant dans le sens d'une influence spécifique des rythmes musicaux sur les différents mouvements. Plus précisément, deux résultats majeurs ont été trouvés : la tâche de tapping a été la plus influencée par la musique rythmique et le comportement des participants

a varié pendant la tâche en fonction du rapport entre leur mouvement et le tempo de la musique.

Concernant la plus grande sensibilité de la tâche de tapping dans notre expérience, nous avons avancé une explication se basant sur la nature des informations motrices impliquées dans la tâche de tapping. Comme l'ont suggéré Delignières et al. (2004), la tâche de tapping peut être considérée comme étant "*event-based*", c'est-à-dire que chaque mouvement de tapping est réalisé avec un but précis dans le temps (selon une certaine période) et dans l'espace (la surface d'appui) correspondant à "l'événement". A l'opposé, les mouvements d'oscillations plus classiques utilisés se basent sur des mécanismes de timing spinaux via les CPG qui envoient des trains d'impulsions à des groupes de muscles antagonistes pour produire un mouvement cyclique. Ainsi, ce seraient les mouvements plus "*event-based*" qui seraient plus influencés par la musique. Cette interprétation est en accord avec les observations réalisées par Naveda et Leman (2010) et Toiviainen et al. (2010) concernant les mouvements de danse. Selon eux, les mouvements de danse seraient basés sur la pulsation musicale et définis dans l'espace et le temps par celle-ci. En d'autres mots, la pulsation musicale jouerait un rôle de guide pour réaliser les mouvements en synchronie avec la musique. Il s'agirait donc de la nature "*event-based*" des mouvements de tapping et de la pulsation musicale qui aurait donné lieu à cette plus grande interaction entre eux. A l'inverse, les mouvements d'oscillations classiques n'avaient pas de "but" dans l'espace et dans le temps, limitant ainsi leur interaction avec la musique. Cette explication rejoint les théories sur les affordances musicales qui suggèrent une interaction entre le corps et la musique lorsque l'individu perçoit une comptabilité entre les deux. Ainsi, la pulsation musicale étant basée sur des mouvements itératifs (e.g. percussion de batterie, Jensenius et al., 2009), la tâche de tapping permet de la représenter alors que les mouvements d'ocillation ne le permettent pas, ou plus difficilement. Il est dès lors raisonnable d'imaginer que des variations dans le flux musicale compatibles avec des mouvements d'oscillations donnent lieu à un phénomène de résonance motrice.

Une autre analyse a porté sur les stratégies mises en place par les participants lors de la tâche. Dans l'ensemble, les patterns comportementaux observés relevaient de deux catégories majeures: la présence ou l'absence d'une influence de la musique sur les mouvements. Une explication commune à l'expression des différents pattern serait que ceux-ci reflètent une incompatibilité perçue entre les mouvements du participant et le tempo musical. Cette interprétation suppose que les participants aient été attirés vers les rythmes musicaux (ou un niveau métrique équivalent). Ainsi, lorsque les participants percevaient leurs mouvements comme étant plus rapides que la musique, ils décéléraient pour se rapprocher du tempo musical. De la même manière, lorsque leurs mouvements étaient perçus comme étant plus lents, ils accéléraient pour se rapprocher du tempo musical. Cette explication se retrouve de manière assez flagrante dans les patterns "*Start Adaptation*", "*Adaptation*" et "*Metrical Change*". Dans ceux-ci, les participants ont accélérés ou décélérés leurs mouvements vers un niveau métrique plus élevés ou plus faible malgré le tempo de la musique qui augmentait. Le pattern "*Metrical Change*" est particulièrement intéressant car il a été généralement observé conjointement à une synchronisation avec la musique. Afin de rester en synchronie avec la

musique, les participants ont du percevoir le niveau métrique inférieur tout en divisant la fréquence de leur mouvement par deux.

Si les résultats précédents suggèrent que la musique guide le comportement des participants (résonance motrice), certains de nos résultats tendent également à montrer un effet réciproque. En effet, nous avons observés des comportements moteurs différents en fonction de la fréquence de résonance manifestée en silence. Une explication à ces résultats serait de considérer l'existence d'un phénomène de résonance perceptive lorsque la musique apparaît. Ainsi, les mouvements des participants auraient orientés la perception d'un certain niveau métrique plutôt qu'un autre. Par ce mécanisme, la perception des participant serait orientée vers un niveau métrique permettant le mouvement (affordance). Cette explication est supportée par les travaux de Todd et al. (2007) et de Dahl et al. (2014) concernant les préférences musicales. Ils montrent que la perception musicale de rythmes est en partie déterminée par les caractéristiques morphologiques et anthropométriques des auditeurs. Ces facteurs donnant lieu à des fréquences de résonance bien spécifiques des différents membres, les mouvements produits en silence seraient le reflet d'un rythme "préféré" par les participants.

Ces deux explications sont également en accord avec les observations reflétant une absence d'influence de la musique sur le mouvement. Ainsi, lorsque l'écart perçu entre le mouvement et le tempo musical était trop important, les mouvements n'étaient pas attirés par le rythme musical. Cette explication a également été suggérée par Repp (2006b) en démontrant que des distracteurs auditifs n'avaient d'effet que dans une zone de 10% autour de la fréquence du mouvement effectué. De plus, les mouvements qui représentent le mieux les patterns correspondant à une absence d'influence de la musique peuvent nous donner un indice sur les mécanismes impliqués. Les mouvements d'oscillation du genou et de l'épaule sont caractérisés par une inertie plus importante, obligeant les participants à mettre en oeuvre des efforts plus important pour modifier leur période d'oscillation afin de s'accorder à la musique. Ainsi, les contraintes motrices imposées à ces mouvements auraient été trop importantes pour permettre une adaptation du comportement à la musique. Cependant, lorsque le tempo musical était proche de la fréquence du mouvement, certains participants ont synchronisés leurs mouvements par un mécanisme de changement de phase.

Cette synchronisation à la musique s'est également retrouvée majoritairement dans la tâche de tapping pour les raisons invoquées plus haut. De manière intéressante, en accord avec l'expérience de Repp (2006b), ces synchronisation avec la musique ont été observées uniquement autour d'une zone de 3 à 15% autour de la fréquence de résonance du participant (pour un membre donné). Ces résultats suggèrent donc une tendance des participants à se synchroniser avec la musique uniquement lorsque cela ne demande pas trop d'effort. L'effort à se synchroniser serait principalement dû aux contraintes motrices imposées au système moteur. Cette explication se retrouve également dans la distribution des synchronisations où le plus faible nombre de synchronisations se retrouve pour les membres les plus proximaux. De plus, les synchronisations ont également été observées après l'expression d'un pattern "Stable", suggérant de nouveau une absence d'attraction de la musique sur le mouvement

lorsque le tempo musical était hors de cette zone d'influence. Lorsque le tempo musical était assez proche de la fréquence du mouvement, les participants exprimaient des patterns de *Synchronisation* ou d'*Adaptation*.

En résumé, ces résultats tendent à montrer que les rythmes musicaux sont traités de manière motrice. Il en résulterait une interaction entre les mouvements d'oscillations produits spontanément et les percepts de mouvements évoqués par les rythmes. Plus précisément, ce serait la nature "*event-based*" de la pulsation musicale qui soit à l'origine des effets observés. Ainsi, les différents rythmes musicaux seraient plus ou moins affordant en fonction du membre utilisé. Nos résultats suggèrent également que la pulsation musicale n'afforde que les mouvements qui permettent de la représenter. Comme l'ont suggéré les théories sur les affordances musicales (Godøy, 2003), la tâche de tapping serait de même nature que les mouvements itératifs associés à la production de la pulsation musicale (Jenseni et al., 2009). Cette idée d'un traitement moteur dépendant des capacités motrices de l'auditeur (affordance musicale) est partagée par les travaux de Todd et al. (2007), Godøy (2003) ainsi que les récents travaux de Dahl et al. (2014).

Applications

Les recherches fondamentales réalisées dans cette thèse peuvent trouver un retentissement dans le domaine de la rééducation motrice à l'aide de musique. La rééducation motrice opère généralement sur plusieurs plans et a pour principe fondamental une approche fonctionnelle des gestes quotidiens qui posent problèmes. Les atteintes les plus courantes se situent au niveau de la marche et des gestes effectués à l'aide des membres supérieurs (Altenmüller, Marco-Pallares, Münte, & Schneider, 2009). Thaut et al. (1996) ont par exemple mis en place une thérapie nommée Rhythmic Auditory Stimulation (RAS) qui se focalise sur un indicage auditif rythmique fourni au patient. Typiquement, il est demandé aux patients de synchroniser leur activité motrice avec des indices auditifs rythmiques sous la forme d'un métronome ou de musique (Thaut et al. 1996; McIntosh, Brown, Rice, & Thaut, 1997). Plus récemment, Schneider, Schönle, Altenmüller et Münte (2007) ont proposé une autre approche à la rééducation motrice à l'aide de la musique. Leur Music Supported Therapy (MST) se focalise quant à elle plus sur la pratique musicale que sur la simple écoute et synchronisation à un rythme. La tâche demandée aux participants consistait à reproduire des courts extraits à l'aide de deux instruments différents, en fonction de la sévérité du trouble moteur. Ces deux thérapies basées sur la musique ont démontré leur efficacité notamment en donnant lieu à des améliorations au niveau des paramètres de la marche et également une amélioration fonctionnelle dans les mouvements des membres supérieurs des membres parétiques (e.g. Thaut et al., 2007; Schneider, Münte, Rodriguez-Fronells, Sailer, & Altenmüller, 2010).

Nos résultats renforcent plusieurs idées qui sont à la base de la rééducation motrice à l'aide de la musique. Premièrement, comme l'ont suggéré nombre d'étude en neuroimagerie, la perception de musique serait associée à un traitement moteur automatique de celle-ci. Ce couplage audio-moteur au niveau cérébral semblerait être un élément déterminant dans le

succès des thérapies supportées par la musique, aussi bien pour la MST (Altenmüller et al., 2009; Schneider et al., 2010) que pour la RAS (Thaut, Abiru, 2010). Altenmüller et al. (2009) ont par exemple montré une augmentation de la connectivité entre les zones sensorimotrices et les zones auditives chez des patients AVC étant traité par l'intermédiaire d'une MST. De plus, l'intégration sensorimotrice des informations perceptives et motrices serait également capitale dans les effets bénéfiques de ces rééducation. Il est cependant important de noter que les mécanismes neuronaux à la base des effets bénéfiques de l'indication perceptif sont à l'heure actuelle encore mal compris.

Deuxièmement, directement lié à l'idée précédente, les tâches motrices impliqués dans la RAS et MST se basent également sur le feedback auditif reçu par le participant à propos de ses actions. Une réduction des informations proprioceptives motrices est courante chez les patients souffrant de troubles moteurs (Johansson, 2010) et le son produit par chacun de leur mouvement permettrait dès lors de remplacer le feedback proprioceptif moteur qui tend à être déficitaire chez ces (Altenmüller, 2009). Un autre aspect important du feedback est qu'il acquière une valeur de but à atteindre dans la RAS. Chaque pas ou chaque fin de mouvement devient l'élément à synchroniser avec l'indice rythmique. Nos résultats renforcent cette idée en montrant que la nature event-based de la tâche de tapping résonne avec la pulsation musicale alors que les mouvements d'oscillations ne sont pas influencés. Dans la MST, les mouvements de productions de musique sont par nature similaires à une tâche de tapping (taper sur un pad électronique) (e.g. Godøy, 2010). Ainsi, les mouvements musicaux jouent et le son qui en découle jouent le rôle de but à atteindre dans la rééducation. De plus, la structure temporelle régulière de la pulsation musicale permet la mise en place de mécanismes de prédiction afin de faciliter la synchronisation.

Troisièmement, le facteur motivationnel véhiculé par l'exercice semble être d'une importance non négligeable dans l'effet de cette thérapie. En effet, les patients rapportent que les sessions de pratique musicales constituent le meilleur moment de leur journée (Altenmüller et al., 2009; Schneider et al. 2010). Cette motivation pourrait dès lors venir du sentiment de plaisir procuré par la sensation d'appartenir à la musique typique du phénomène de groove musical. Ainsi, les participants seraient "dans le groove" lorsqu'ils se synchronisent avec la musique dans les exercices de rééducation. Conformément aux études sur le groove, nous avons également montré que les épisodes de synchronisation avec la musique étaient vécu de manière positive.

Quatrièmement, nous avons montré l'importance d'un paramètre sur lequel la RAS se base : les capacités motrices du participants. Plus précisément, les thérapies RAS démontrent leurs effets lorsque le patient se synchronise avec un rythme proche de celui qu'il produirait naturellement en silence, reflétant ses propres capacités motrices. Howe, Lovgreen, Cody, Ashton et Oldham (2003) ont par exemple montré des améliorations au niveau cadence et vitesse de la marche lorsqu'une musique dont le tempo représentait 107,5 et 115% de la marche préférée. Comparativement, un tempo musical représentant 85% de la fréquence de marche préférée donnait lieu à une détérioration des paramètres de la marche. Conformément aux récents travaux de Todd et al. (2007) et Dahl et al. (2014), nous avons montré que ce

paramètre jouerait un rôle autant dans la perception musicale que dans la façon dont les participants bougent en réaction à la musique.

Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus dans la première partie de la thèse nous donnent un aperçu des implications cognitives de la production de mouvements en rythme avec la musique. Cette problématique ne semble pas avoir reçu beaucoup d'attention jusqu'ici. Brown et Palmer (2012) ont suggéré un effet bénéfique d'un apprentissage sensorimoteur de nouveaux morceaux de musique dans le cadre de leur production. Néanmoins, à notre connaissance, aucune étude n'avait tenté de reproduire ce genre d'effet dans une tâche perceptive. Selon nos résultats, bouger en musique serait délétère à la mémorisation d'un morceau de musique car le traitement nécessaire à la production des mouvements associés ne favorise pas un traitement profond de la musique. Plus précisément, ce traitement superficiel serait inhérent à l'expression des affordances musicales perçues lors de l'écoute. Ainsi, dans des conditions écologiques d'écoute musicale (e.g. boîte de nuit), nous pouvons dire que bouger en rythme sur la musique n'aide pas à sa mémorisation.

Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons levé le voile sur plusieurs mécanismes importants dans l'interaction entre musique et mouvement. Conformément aux précédentes études de la thèse, nos résultats suggèrent que la musique est traitée de manière motrice de façon automatique. Nous avons également mis en évidence l'importance de la nature "*event-based*" de la pulsation musicale et de son degré de compatibilité avec les mécanismes de timing impliqués dans la production des différents mouvements étudiés. De plus, nos résultats ont suggéré que le comportement des participants face aux distracteurs rythmiques serait en partie dû à la perception d'une incongruence entre leurs mouvements et la musique, liée au traitement moteur des rythmes perçus.

Le point commun de nos études se situe dans le fait que les mouvements induits par la musique seraient l'expression des affordances musicales. Celles-ci donneraient lieu à un traitement superficiel du matériel musical dans la première partie de la thèse. De la même manière, les affordances musicales seraient également à la base des effets obtenus dans la deuxième partie de la thèse. Le potentiel moteur inhérent aux distracteurs rythmiques aurait été traité automatiquement par les participants et celui-ci aurait interagi avec le système moteur donnant lieu à l'expression des différents patterns comportementaux observés. Ce potentiel moteur a également été l'objet d'analyses dans la première partie de la thèse. Ainsi, nous avons suggéré que le *Groove musical* (i.e. l'envie de bouger en musique) était une caractéristique musicale importante dans la distinction entre deux morceaux de musique.

Plusieurs limites à nos études peuvent être mentionnées. Tout d'abord, dans la première et deuxième étude, l'association entre un mouvement et un morceau de musique n'a pu se faire qu'en une seule tentative. Brown et Palmer (2012) ont montré que leur effet auditori-moteur n'apparaissait qu'après 6 répétitions de l'association. Il est donc possible que le manque de répétition dans ces deux études puisse avoir modéré nos effets. De futures

recherches devront dès lors examiner l'impact de la répétition sur les mouvements induits par la musique quant à leur représentation mentale consécutive à un encodage auditori-moteur de morceaux nouveaux. La même remarque pourrait également être faite sur la spécificité des mouvements induits par la musique quant à leur capacité à représenter un morceau en particulier. Dans notre troisième étude, la remarque inverse pourrait être faite dans le sens où les mouvements d'oscillations produits par les participants sont loin d'être représentatifs de la façon dont les individus interagissent avec la musique, à l'exception de la tâche de tapping. Dans cette critique il est cependant possible de trouver une explication au fait, justement, que les individus n'interagissent pas avec la musique avec de tels mouvements d'oscillations. En se basant sur les mouvements induits par la musique étudiés par Toiviainen et al. (2010) ou encore Naveda et Leman (2010), les résultats auraient pu être différents. En effet, en demandant aux participants de produire des mouvements typiquement associés à une pratique de danse (novice ou experte), il est très probable que les participants soient plus influencés par la musique. Ensuite, la composition du matériel musical utilisé a pu donner lieu à des effets insoupçonnés, même si les morceaux ont été créés en gardant un contrôle sur le tempo.

La recherche future devra se pencher sur la délimitation entre un effet bénéfique et délétère des mouvements induits par la musique sur la cognition musicale. Nos résultats semblent indiquer un effet négatif mais nous n'avons étudié que la mémoire explicite. Il est tout à fait envisageable que des facteurs implicites jouent un rôle dans un encodage sensorimoteur de matériel musical nouveau. Dans ce sens, les mouvements induits par la musique pourraient ne pas être adéquats à l'étude de phénomènes explicites. De la même manière, l'accès effectif aux affordances (i.e. bouger en rythme) pourrait également avoir un effet lors de la phase de reconnaissance. De futures recherches devront déterminer si bouger en rythme avec la musique ne serait pas bénéfique à la reconnaissance des morceaux appris. Finalement, la notion de groove musical devra être approfondie dans le futur car elle semble être au centre de ce qui motive les auditeurs à bouger en rythme avec la musique. Il sera autant question de découvrir ce qui dans la musique nous donne envie de bouger et également les implications que ces mouvements ont sur l'expérience de l'auditeur.

Bibliographie

- Adolph, K. E. (1997). Learning in the development of infant locomotion. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 62(1), 1-162
- Alaerts, K., Swinnen, S. P., & Wenderoth, N. (2009). Is the human primary motor cortex activated by muscular or direction-dependent features of observed movements?. *Cortex*, 45(10), 1148-1155.
- Altavilla, A., Caramiaux, B., Tanaka A. (2013). "Towards Gestural Sonic Affordances." in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME)*. Seoul, South Korea.
- Altenmüller, E., Marco-Pallares, J., Münte, T. F., & Schneider, S. (2009). Neural Reorganization Underlies Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1), 395-405.
- Aglioti, S. M., & Pazzaglia, M. (2010). Representing actions through their sound. *Experimental Brain Research*, 206, 141–151.
- Anderson, J. R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge, MA: Harvard University.
- Aschersleben, G. (2002). Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and Cognition*, 48, 66–79.
- Atkinson, R. L., Atkinson, R. C., Smith, E. E., Bem, D. J., & Nolen-Hoeksema, S. (2000). *Hilgard's introduction to psychology* (13th ed.). Fort Worth, TX: Harcourt College Publishers.
- Auvray, M., Hoellinger, T., Hanneton S., Roby-Brami, A. (2011). Perceptual weight judgments when viewing one's own and others' movements under minimalist conditions of visual presentation. *Perception*, 40, 1081–1103
- Aziz-Zadeh, L., Iacoboni, M., Zaidel, E., Wilson, S., and Mazziotta, J. (2004). Left hemisphere motor facilitation in response to manual action sounds. *European Journal of Neuroscience*, 19(9), 2609–2612
- Bangert, M., & Altenmüller, E. O. (2003). Mapping perception to action in piano practice: a longitudinal DC-EEG study. *BMC neuroscience*, 4(1), 26.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., ... & Altenmüller, E. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists: evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, 30(3), 917-926.
- Bargh, J. A., Chen, M., & Burrows, L. (1996). Automaticity of social behavior: Direct effects of trait construct and stereotype activation on action. *Journal of Personality and Social Psychology*, 71, 230–244.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Science*, 22, 577–660
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617-645.

- Barsalou, L. (2010). Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in Cognitive Science*, 2, 716–724
- Barsingerhorn, A. D., Zaal, F. T. J. M., Smith, J., & Pepping, G. J. (2012). On possibilities for action: the past, present and future of affordance research. *Avant*, 3(2), 54-69.
- Berthoz, A. (1997). *Le Sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Białyńska, A., Dalla Bella, S., & Jaśkowski, P. (2011). Increasing stimulus intensity does not affect sensorimotor synchronization. *Psychological research*, 75(1), 43-53.
- Block, N. (1995). The mind as the software of the brain. In E. E. Smith & D. N. Osherson (Eds.), *Thinking* (pp. 377–425). Cambridge, MA: MIT Press.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). "Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion" in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(20), 11818-11823.
- Borghi, A. M. (2005). Object concepts and action. In D. Pecher & R. A. Zwaan (Eds.), *Grounding cognition: The role of perception and action in memory, language, and thinking* (pp. 8-34). Cambridge: Cambridge University Press.
- Brochard, R., Abecasis, D., Potter, D., Ragot, R., Drake, C. (2003). The “ticktock” of our internal clock: Direct brain evidence of subjective accents in isochronous sequences. *Psychological Science*, 14, 362–366
- Brown, R. M., & Palmer, C. (2012). Auditory–motor learning influences auditory memory for music. *Memory & Cognition*, 40(4), 567-578.
- Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M., & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory: sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1081.
- Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2005). Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: a combined TMS and behavioral study. *Cognitive Brain Research*, 24(3), 355-363.
- Burger, B., Thompson, M. R., Luck, G., Saarikallio, S., & Toivainen, P. (2013). Influences of rhythm-and timbre-related musical features on characteristics of music-induced movement. *Frontiers in Psychology*, 4.
- Cacioppo, J. T., Priester, J. R., & Berntson, G. G. (1993). Rudimentary determinants of attitudes: II. Arm flexion and extension have differential effects on attitudes. *Journal of personality and social psychology*, 65(1), 5.
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D., Passingham, R., & Haggard, P. (2006). Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Current Biology*, 16, 1-6.
- Chambers, C. G., Tanenhaus, M. K., Eberhard, K. M., Filip, H., & Carlson, G. N. (2002). Circumscribing referential domains during real-time language comprehension. *Journal of Memory & Language*, 47, 30-49.

- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague: Mouton & Co.
- Chomsky, N. (1959). A review of B. F. Skinner's Verbal Behavior. *Language*, 35, 26–58.
- Clark, A. (2001). Reasons, Robots, and the Extended Mind. *Mind and Language*, 16(2): 121-145.
- Clarke, E. F. (2005). *Ways of Listening: An ecological approach to the perception of musical meaning*. Oxford, NY: Oxford University Press.
- Cooper, G. & Meyer, L.B. (1960). *The rhythmic structure of music*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Craik, F. I., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(3), 268.
- Cross, E. S., Hamilton, A. F. D. C., & Grafton, S. T. (2006). Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *Neuroimage*, 31(3), 1257-1267.
- Cummins, F. (2009). Rhythm as an affordance for the entrainment of movement. *Phonetica*, 66(1-2), 15-28.
- Dahl, S., & Friberg, A. (2007). Visual perception of expressiveness in musicians' body movements. *Music Perception*, 24, 433–454.
- Dahl, S., Huron, D., Brod, G., & Altenmüller, E. (2014). Preferred Dance Tempo: Does Sex or Body Morphology influence how we groove? *Journal of New Music Research*, 43, 214-223.
- Dalla Bella, S., Białuńska, A., & Sowiński, J. (2013). Why Movement Is Captured by Music, but Less by Speech: Role of Temporal Regularity. *PloS one*, 8(8), e71945.
- Dalla Bella, S., Peretz, I., & Aronoff, N. (2003). Time course of melody recognition: A gating paradigm study. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 1019-1028.
- Davidson, J. W. (1993). Visual perception of performance manner in the movements of solo musicians. *Psychology of Music*, 21(2), 103-113.
- Davidson, J. W. (1994). Which areas of a pianist's body convey information about expressive invention to an audience?. *Journal of Human Movement Studies*, 26(6), 279.
- Davidson, P. R., & Wolpert, D. M. (2005). Widespread access to predictive models in the motor system: a short review. *Journal of Neural Engineering*, 2(3), S313.
- Davis, T. J., Riley, M. A., Shockley, K., & Cummins-Sebree, S. (2010). Perceiving affordances for joint actions. *Perception*, 39(12), 1624-1644.
- De Bruyn, L., Leman, M., & Moelants, D. (2008). Quantifying children's embodiment of musical rhythm in individual and group settings. In *The 10th International Conference on Music Perception and Cognition*. Sapporo, Japan.
- Decety, J. (1996). Do imagined and executed actions share the same neural substrate?. *Cognitive Brain Research*, 3(2), 87-93.

- Decety, J., & Grèzes, J. (2006). The power of simulation: Imagining one's own and other's behavior. *Brain Research*, 1079, 4-14.
- Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioral Brain Research*, 34(1-2), 35-42.
- Delignières, D., Lemoine, L., & Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23(2), 87-103..
- Delignières, D., Torre, K., & Lemoine, L. (2009). Long-range correlation in synchronization and syncopation tapping: A linear phase correction model. *PLoS ONE*, 4, e7822.
- De Lucia, M., Camen, C., Clarke, S., & Murray, M. M. (2009). The role of actions in auditory object discrimination. *Neuroimage*, 48(2), 475-485.
- de Manzano, O., Theorell, T., Harmat, L., & Ullén, F. (2010). The psychophysiology of flow during piano playing. *Emotion*, 10(3), 301.
- Demos, A. P., Chaffin, R., & Marsh, K. L. (2010). "Spontaneous vs. intentional entrainment to a musical beat." In *Proceedings of the 11th International Conference on Music Perception and Cognition* (pp. 381-384). Washington, USA.
- Dennett, D. C. (1969). *Content and consciousness*. Oxford, England: Humanities Press.
- Dijksterhuis, A., Aarts, H., Bargh, J. A., & van Knippenberg, A. (2000). On the relation between associative strength and automatic behavior. *Journal of Experimental Social Psychology*, 36(5), 531-544.
- Dijksterhuis, A., & Bargh, J. A. (2001). The perception-behavior expressway: automatic effects of social perception on social behavior. In M. P. Zanna (Eds.) *Advances in Experimental Social Psychology* (Vol. 33, pp. 1-40). San Diego, CA: Academic Press.
- Dimberg, U., Thunberg, M., & Elmehed, K. (2000). Unconscious facial reactions to emotional facial expressions. *Psychological science*, 11(1), 86-89.
- Doyle, C. L. (2000). Psychology: Definition. In A. E. Kazdin (Eds.), *Encyclopedia of psychology* (Vol. 6, pp. 375-376). Washington, DC: American Psychological Association
- Drake C, Penel A, Bigand E (2000) Tapping in time with mechanically and expressively performed music. *Music Perception*, 18(1), 1-23.
- Drost, U. C., Rieger, M., Brass, M., Gunter, T. C., & Prinz, W. (2005). Action-effect coupling in pianists. *Psychological Research*, 69(4), 233-241.
- Drost, U. C., Rieger, M., & Prinz, W. (2007). Instrument specificity in experienced musicians. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(4), 527-533.
- D'Ausilio, A., Altenmüller, E., Olivetti Belardinelli, M., & Lotze, M. (2006). Crossmodal plasticity of the motor cortex while listening to a rehearsed musical piece. *European Journal of Neuroscience*, 24, 955-958.
- D'Ausilio, A., Pulvermüller, F., Salmas, P., Bufalari, I., Begliomini, C., and Fadiga, L. (2009). The motor somatotopy of speech perception. *Current Biology*, 19, 381-385.

- Ellis, R. & Tucker, M. (2000). Micro-affordances: The potentiation of components of action by seen objects. *British Journal of Psychology*, 91(4), 451–71.
- Epstein, D. (1995). *Shaping time: Music, the brain, and performance*. New York, NY: Schirmer Books.
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., & Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: A TMS study. *European Journal of Neuroscience*, 15, 399–402.
- Fagioli, S., Hommel, B., & Schubotz, R. I. (2007). Intentional control of attention: Action planning primes action-related stimulus dimensions. *Psychological Research*, 71(1), 22–29.
- Fazio, P., Cantagallo, A., Craighero, L., D’Ausilio, A., Roy, A. C., Pozzo, T., Calzolari, F., Granieri, E., & Fadiga, L. (2009). Encoding of human action in Broca’s area. *Brain*, 132(Pt 7), 1980–1988.
- Feld, S., & Keil, C. (1994). *Music grooves: Essays and dialogues*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Ferreri, L., Aucouturier, J.-J., Muthalib, M., Bigand, E., & Bugaiska, A. (2013) Music improves verbal memory encoding while decreasing prefrontal cortex activity: an fNIRS study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7.
- Ferreri, L., Bigand, E., Perrey, S., Muthalib, M., Bard, P., & Bugaiska, A. (2014). Less effort, better results: how does music act on prefrontal cortex in older adults during verbal encoding? An fNIRS study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8.
- Fitch, W. T., & Rosenfeld, A. J. (2007). Perception and production of syncopated rhythms. *Music Perception*, 25, 43–58.
- Flach, R. (2005). The transition from synchronization to continuation tapping. *Human Movement Science*, 24(44), 465–483.
- Fodor, A. (1975). *The language of thought*. New York, NY: Crowell.
- Fogassi, L., Ferrari, P. F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., & Rizzolatti, G. (2005). Parietal lobe: from action organization to intention understanding. *Science*, 308(5722), 662–667.
- Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. In D. Deutsch (Ed.), *The psychology of music* (pp. 149–180). Orlando, FL: Academic Press.
- Galati G, Committeri G, Spitoni G, Aprile T, Di Russo F, et al. (2008) A selective representation of the meaning of actions in the auditory mirror system. *Neuroimage*, 40, 1274–1286.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593–609.
- Gallese, V., & Goldman, A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in cognitive sciences*, 2(12), 493–501.

- Gallese, V., & Lakoff, G. (2005). The brain's concepts: The role of the sensorimotor system in conceptual knowledge. *Cognitive Neuropsychology*, 22(3/4), 455-479
- Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in cognitive sciences*, 8(9), 396-403.
- Gazzola, V., Aziz-Zadeh, L., & Keysers, C. (2006). Empathy and the somatotopic auditory mirror system in humans. *Current Biology*, 16, 1824-1829.
- Gibson, E. J., Riccio, G., Schmuckler, M. A., Stoffregen, T. A., Rosenberg, D., & Taormina, J. (1987). Detection of the traversability of surfaces by crawling and walking infants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(4): 533-544.
- Gibson, E. J., & Walk, R. D. (1960). The "visual cliff." *Scientific American*, 202, 64-71.
- Gibson J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, MA: Houghton Mifflin/.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Psychology Press.
- Glenberg, A. M. (1997). What memory is for. *Behavioral and Brain Science*, 20, 1-55.
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586-596.
- Glenberg, A.M. and Kaschak, M.P. 2002. "Grounding language in action". *Psychonomic Bulletin and Review*, 9, 558-565.
- Glenberg, A. M., Sato, M., Cattaneo, L., Riggio, L., Palumbo, D., & Buccino, G. (2008). Processing abstract language modulates motor system activity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(6), 905-919.
- Godøy, R. I. (2009). Geometry and effort in gestural renderings of musical sound. *Gesture-Based Human-Computer Interaction and Simulation. Lecture Notes in Computer Science 5085*, 205-215.
- Godøy, R. I. (2010). Gestural affordances of musical sound. In R. I. Godøy & M. Leman (Eds.) *Musical gestures: Sound, movement and meaning* (pp. 103-125). New York, NY: Routledge.
- Godøy, R. I., E. Haga, and A. R. Jensenius (2006a). Exploring music-related gestures by sound-tracing. - a preliminary study. In *2nd ConGAS International Symposium on Gesture Interfaces for Multimedia Systems, May 9-10 2006*, Leeds, UK.
- Godøy, R. I., E. Haga, and A. R. Jensenius (2006b). Playing "air instruments": Mimicry of sound-producing gestures by novices and experts. In S. Gibet, N. Courty, and J.-F. Kamp (Eds.), *Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation: 6th International Gesture Workshop, GW 2005, Berder Island, France, May 18-20, 2005, Revised Selected Papers, Volume 3881/2006*, pp. 256-267. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

- Godøy, R. I., & Leman, M. (2010). *Musical gestures: Sound, movement, and meaning*. New York, NY: Routledge.
- Grafton, S. T., Arbib, M. A., Fadiga, L. & Rizzolatti, G. (1996) Localization of grasp representations in humans by positron emission tomography. 2. Observation compared with imagination. *Experimental Brain Research*, 112, 103–111.
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 893-906.
- Grewe, O., Nagel, F., Kopiez, R., & Altenmüller, E. (2007). Emotions over time: Synchronicity and development of subjective, physiological, and facial reactions to music. *Emotion*, 7, 774–788.
- Grèzes, J. & Decety, J. (2001) Functional anatomy of execution, mental simulation, observation and verb generation of actions: A meta-analysis. *Human Brain Mapping* 12(1):1–19.
- Grosjean, M., Shiffrar, M., & Knoblich, G. (2007). Fitts's law holds for action perception. *Psychological Science*, 18(2), 95-99.
- Haga, E. (2008). *Correspondences between music and body movement* (Doctoral dissertation, Faculty of Humanities, University of Oslo Unipub).
- Halpern, A. R., & Müllensiefen, D. (2008). Effects of timbre and tempo change on memory for music. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(9), 1371-1384.
- Hamann, S. (2001). Cognitive and neural mechanisms of emotional memory. *Trends in cognitive sciences*, 5(9), 394-400.
- Hamilton, A., Wolpert, D., & Frith, U. (2004). Your own action influences how you perceive another person's action. *Current Biology*, 14(6), 493-498.
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1), 335-346.
- Hatfield, E., Cacioppo, J. T., & Rapson, R. L. (1994). *Emotional contagion*. New York: Cambridge University Press.
- Haueisen, J., & Knösche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 786-792.
- Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in the human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41, 301-307.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York, NY: Wiley.
- Hertzog, C., Dunlosky, J., & Sinclair, S. M. (2010). Episodic feeling-of-knowing resolution derives from the quality of original encoding. *Memory & Cognition*, 38(6), 771-784.
- Higuchi, T., Takada, H., Matsuura, Y., & Imanaka, K. 2004. Visual Estimation of Spatial Requirements for Locomotion in Novice Wheelchair Users. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 10(1): 55-66.

- Hohmann T, Troje N F, Olmos A, Munzert J, 2011 “The influence of motor expertise and motor experience on action and actor recognition” *Journal of Cognitive Psychology*, 23, 403–415.
- Holt, K. G., Jeng, S. F., Ratcliffe, R., & Hamill, J. (1995). Energetic cost and stability during human walking at the preferred stride frequency. *Journal of motor behavior*, 27(2), 164–178.
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The theory of event coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Science.*, 24, 849–878.
- Hostetter, A. B., & Alibali, M. W. (2008). Visible embodiment: Gestures as simulated action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15, 495–514.
- Howe, T.E., Lovgreen, B., Cody, F.W., Ashton, V.J., & Oldham, J.A. (2003). Auditory cues can modify the gait of persons with early-stage Parkinson’s disease: A method for enhancing Parkinsonian walking performance?. *Clinical Rehabilitation*, 17(4), 363–367.
- Hupbach, A., Hardt, O., Gomez, R., & Nadel, L. (2008). The dynamics of memory: Context-dependent updating. *Learning & Memory*, 15(8), 574–579.
- Hurley, S. (2008). Understanding Simulation1. *Philosophy and Phenomenological Research*, 77(3), 755–774.
- Iacoboni, M. (2005). Understanding others: Imitation, language and empathy. In S. Hurley & N. Chater (Eds.), *Perspectives on imitation: From mirror neurons to memes* (pp. 77–99). Cambridge, MA: MIT Press.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286(5449), 2526–2528.
- Iyer, V. (2002). Embodied mind, situated cognition, and expressive microtiming in African-American music. *Music Perception*, 19(3), 387–414.
- Jackendoff, R. (1995). *Languages of the mind: essays on mental representation*. Cambridge, MA: MIT Press
- James W. (1890). *The principles of psychology*. New York, NY: Holt.
- Janata, P., Tomic, S. T., & Haberman, J. M. (2012). Sensorimotor coupling in music and the psychology of the groove. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(1), 54.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behav. Brain Sci.*, 17(02), 187–202.
- Jeannerod, M., (1999). To act or not to act: perspectives on the representation of actions. *Quarterly Journal of Experiment Psychology*, 52A, 1–29.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, S103–S109.
- Jeannerod, M., & Decety, J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology*, 5, 727–732.

- Jensenius, A. R., Wanderley, M., Godøy, R. I., and Leman, M. (2009). Musical gestures : concepts and methods in research. In R. I. Godøy & M. Leman (Eds.) *Musical gestures: Sound, movement and meaning* (pp. 12-35). New York, NY: Routledge.
- Jiang, Y., & Mark, L. S. 1994. The effect of gap depth on the perception of whether a gap is crossable. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 56(6): 691-700.
- Johnson-Frey, S. H., Maloof, F. R., Newman-Norlund, R., Farrer, C., Inati, S., Grafton, S. T. (2003). Actions or hand-object interactions? Human inferior frontal cortex and action observation. *Neuron*, 39, 1053–1058.
- Kaschak MP, Madden CJ, Theriault DJ, Yaxley RH, AveyardM, Blanchard, A. A., et al. (2005). Perception of motion affects language processing. *Cognition*, 94:B79–B89.
- Keil, C., & Feld, S. (1994). *Music grooves*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Keller, P. E., Knoblich, G., & Repp, B. H. (2007). Pianists duet better when they play with themselves: On the possible role of action simulation in synchronization. *Consciousness and Cognition*, 16, 102–111.
- Keller, P., & Rieger, M. (2009). Special Issue: Musical movement and synchronization. *Music Perception*, 26, 397-400.
- Kelso, J.A.S., Fuchs, A., Lancaster, R., Holroyd, T., Cheyne, D., Weinberg, H. (1998). Dynamic cortical activity in the human brain reveals motor equivalence. *Nature* 392(23), 814–818
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2003). Memory enhancement for emotional words: Are emotional words more vividly remembered than neutral words?. *Memory & Cognition*, 31(8), 1169-1180.
- Kinsella-Shaw, J. M., Shaw, B., & Turvey, M. T. 1992. Perceiving 'Walk-on-able' Slopes. *Ecological Psychology*, 4(4): 223-239.
- Knoblich, G., & Flach, R. (2001). Predicting the effects of actions: interactions of perception and action. *Psychological Science*, 12, 467–472.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297(5582), 846-848.
- Kornysheva, K., von Anshelm-Schiffer, A. M., & Schubotz, R. I. (2011). Inhibitory stimulation of the ventral premotor cortex temporarily interferes with musical beat rate preference. *Human Brain Mapping*, 32(8), 1300-1310.
- Kornysheva, K., von Cramon, D. Y., Jacobsen, T., & Schubotz, R. I. (2010). Tuning-in to the beat: Aesthetic appreciation of musical rhythms correlates with a premotor activity boost. *Human Brain Mapping*, 31(1), 48-64.
- Kosslyn SM. 1980. *Image and Mind*. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press.
- Lahav, A., Katz, T., Chess, R., & Saltzman, E. (2013). Improved motor sequence retention by motionless listening. *Psychological research*, 77(3), 310-319.

- Lahav, A., Saltzman, E., & Schlaug, G. (2007). Action representation of sound: audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions. *The Journal of Neuroscience*, 27(2), 308-314.
- Lakoff G. 1987. *Women, Fire, and Dangerous Things: What Categories Reveal About the Mind*. Chicago: Univ. Chicago Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1980). *Metaphors we live by*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Lakoff, G., & Johnson, M. (1999). *Philosophy in the flesh*. New York, NY: Basic Books.
- Large, E. W. (2008). Resonating to musical rhythm: theory and experiment. In S. Grondin (Eds.) *The Psychology of Time* (pp. 189-232). West Yorkshire: Emerald.
- Large, E. W. (2010). Neurodynamics of music. In M. Riess Jones, R. R. Fay & A. N. Popper (Eds.), *Springer Handbook of Auditory Research, Vol. 36: Music Perception* (pp. 201-231). New York: Springer.
- Large, E. W., & Palmer, C. (2002). Perceiving temporal regularity in music. *Cognitive Science*, 26(1), 1-37.
- Lashley, K. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. Jeffress (Ed.), *Cerebral Mechanisms of Behavior* (pp.112-136). New York: Wiley.
- Leman, M. (2008). *Embodied Music: Cognition and Mediation Technology*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Leman, M., Desmet, F., Styns, F., van Noorden, L., & Moelants, D. (2009). Sharing musical expression through embodied listening: a case study based on Chinese guqin music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 26(3), 263-278.
- Leman, M., Moelants, D., Varewyck, M., Styns, F., van Noorden, L., & Martens, J. P. (2013). Activating and relaxing music entrains the speed of beat synchronized walking. *PloS ONE* 8:e67932.
- Lerdahl, F., & Jackendoff, R. (1985). *A generative theory of tonal music*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Lesaffre, M., De Voogdt, L., Leman, M., De Baets, B., De Meyer, B., & Martens, J.-P. (2008). How potential users of music search and retrieval systems describe the semantic quality of music. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59(5), 695-707.
- Lewis, J. W., Brefczynski, J. A., Phinney, R. E., Janik, J. J., & DeYoe, E. A. (2005). Distinct cortical pathways for processing tool versus animal sounds. *Journal of Neuroscience*, 25, 5148–5158.
- Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.

- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33, 1189–1207.
- London, J. M. (2004). *Hearing in Time: Psychological Aspects of Musical Meter*. New York, NY: Oxford University Press.
- López Cano, R. L. (2006). What kind of affordances are musical affordances? A semiotic approach. In *Simposio Internazionale sulle Scienze del Linguaggio Musicale*. Bologna, Italy.
- Lorås, H., Sigmundsson, H., Talcott, J. B., Öhberg, F. O., & Stensdotter, A. K. (2012). Timing continuous or discontinuous movements across effectors specified by different pacing modalities and intervals. *Experimental Brain Research*, 220, 335–347.
- Lotze, M., Scheler, G., Tan, H.R., Braun, C. & Birbaumer, N. (2003a) The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *Neuroimage*, 20, 1817–1829.
- Loula, F., Prasad, S., Harber, K., & Shiffrar, M. (2005). Recognizing people from their movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(1), 210.
- Luck, G., & Nte, S. (2008). A new approach to the investigation of conductors' gestures and conductor-musician synchronization, and a first experiment. *Psychology of Music*, 36, 81–99.
- Luck, G., & Sloboda, J. A. (2008). Exploring the spatiotemporal properties of the beat in simple conducting gestures using a synchronization task. *Music Perception*, 25, 225–239.
- Luck, G., & Sloboda, J. A. (2009). Spatio-temporal cues for visually mediated synchronization. *Music Perception*, 26, 465–473.
- MacDougall, H. G., & Moore, S. T. (2005). Marching to the beat of the same drummer: the spontaneous tempo of human locomotion. *Journal of Applied Physiology*, 99(3), 1164–1173.
- MacKay-Lyons, M. (2002). Central pattern generation of locomotion: a review of the evidence. *Physical Therapy*, 82(1), 69–83.
- MacLeod, C. M. (2011). I said, you said: The production effect gets personal. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18, 1197–1202.
- MacLeod, C. M., Gopie, N., Hourihan, K. L., Neary, K. R., & Ozubko, J. D. (2010). The production effect: Delineation of a phenomenon. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 671–685.
- Madison, G. (2006). Experiencing groove induced by music: Consistency and phenomenology. *Music Perception*, 24, 201–208.

- Madison, G. (2009). An auditory illusion of infinite tempo change based on multiple temporal levels. *PLoS ONE*, 4, e8151.
- Madison, G., Gouyon, F., Ullén, F., & Hörnström, K. (2011). Modeling the tendency for music to induce movement in humans: First correlations with low-level audio descriptors across music genres. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 37(5), 1578.
- Maes, P. J., & Leman, M. (2013). The influence of body movements on children's perception of music with an ambiguous expressive character. *PloS one*, 8(1), e54682.
- Maes, P. J., Leman, M., Palmer, C., & Wanderley, M. (2014). Action-based effects on music perception. *Frontiers in Psychology*, 4, 1008.
- Mark, L. S. (1987). Eyeheight-scaled information about affordances: a study of sitting and stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3), 361.
- Mark, L. S., Balliett, J. A., Craver, K. D., Douglas, S. D., & Fox, T. (1990). What an actor must do in order to perceive the affordance for sitting. *Ecological Psychology*, 2(4): 325-366.
- Marslen-Wilson, W. D. (1987). Functional parallelism in spoken word-recognition. *Cognition*, 25, 71-102.
- Martens, P. (2011). The ambiguous tactus: Tempo, subdivision benefit, and three listener strategies. *Music Perception*, 28, 433–448.
- Martens, P. (2012). Tactus in Performance: Constraints and Possibilities. *MTO: A Journal of the Society for Music Theory*, 18(1), 1-9
- McGurk, H., and MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature* 264, 746–748.
- McIntosh, G. C., Brown, S. H., Rice, R. R., & Thaut, M. H. (1997). Rhythmic auditory-motor facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 62(1), 22-26.
- McKinney, M. F., & Moelants, D. (2006). Ambiguity in tempo perception: What draws listeners to different metrical levels? *Music Perception*, 24, 155–166.
- Meier, B. P., Schnall, S., Schwarz, N., & Bargh, J. A. (2012). Embodiment in social psychology. *Topics in Cognitive Science*, 4, 705–716.
- Menin, D., & Schiavio, A. (2012). Rethinking Musical Affordances. *AVANT. Pismo Awangardy Filozoficzno-Naukowej*, (2), 202-215.
- Merker, B. H., Madison, G. S., & Eckerdal, P. (2009). On the role and origin of isochrony in human rhythmic entrainment. *Cortex*, 45, 4–17.
- Miall, R. C., Stanley, J., Todhunter, S., Levick, C., Lindo, S., & Miall, J. D. (2006). Performing hand actions assists the visual discrimination of similar hand postures. *Neuropsychologia*, 44(6), 966-976.
- Miall, R. C. (2007). Walking the walk. *Nature Neurosci.*, 10(8), 940-941.

- Mishima, J. (1965). *Introduction to the Morphology of Human Behaviour: The Experimental Study of Mental Tempo*. Tokyo: Tokyo Publishing.
- Mitchell, R. W., & Gallaher, M. C. (2001). Embodying music: Matching music and dance in memory. *Music Perception*, 19(1), 65-85.
- Miyake, Y., Onishi, Y., & Pöppel, E. (2004). Two types of anticipation in synchronization tapping. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 64, 415-426.
- Moelants, D. (2002). Preferred tempo reconsidered. In C. Stevens, D. Burnham, G. McPherson, E. Schubert, & J. Renwick (Eds.), *Proceedings of the 7th international conference on music perception and cognition, Sydney, 2002* (pp. 580–583). Adelaide: Causal Productions.
- Moussard, A., Bigand, E., Belleville, S. & Peretz, I. (2012) Music as an Aid to Learn New Verbal Information in Alzheimer's Disease. *Music Perception*, 29, 521-531
- Morsella, E., Lanska, M., Berger, C. C., & Gazzaley, A. (2009). Indirect cognitive control through top-down activation of perceptual symbols. *European Journal of Social Psychology*, 39, 1173–1177.
- Müsseler, J. (1999). How independent from action control is perception?: An event-coding account for more equally-ranked crosstalks. *Advances in Psychology*, 129, 121-147.
- Naveda, L. & Leman, M. (2008). Representation of Samba dance gestures, using a multi-modal analysis approach. In E. Ruffaldi, Fontana, M. (Eds.) *ENACTIVE08 — 5th International Conference on Enactive Interfaces (19-21 November)* (pp. 68-74). Pisa: Edizioni ETS.
- Naveda, L., & Leman, M. (2009). A cross-modal heuristic for periodic pattern analysis of samba music and dance. *Journal of New Music Research*, 38(3), 255-283.
- Naveda, L., & Leman, M. (2010). The spatiotemporal representation of dance and music gestures using topological gesture analysis (TGA). *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 28(1), 93-111.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall.
- Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Niedenthal, P. M., Brauer, M., Halberstadt, J. B., & Innes-Ker, A. H. (2001). When did her smile drop? Facial mimicry and the influences of emotional state on the detection of change in emotional expression. *Cognition and Emotion*, 15, 853–864.
- Niedenthal, P. M., Winkielman, P., Mondillon, L., & Vermeulen, N. (2009). Embodiment of emotion concepts. *Journal of Personality and Social Psychology*, 96(6), 1120–1136.
- Noe, A. (2004). *Action in Perception*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Nowicki, L., Prinz, W., Grosjean, M., Repp, B. H., & Keller, P. E. (2013). Mutual adaptive timing in interpersonal action coordination. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 23(1), 6.
- Nusseck, M., & Wanderley, M. (2009). Music and motion-how music-related ancillary body movements contribute to the experience of music. *Music Perception*, 26(4), 335–353.
- Oberman, L., Winkielman, P., & Ramachandran, V. (2007). Face to face: Blocking facial mimicry can selectively impair recognition of emotional expressions. *Social Neuroscience*, 2(3–4), 167–178.
- O'Regan, J. K. & Noë, A. (2001) A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939-973.
- Oudejans, R. R. D., Michaels, C. F., Bakker, F. C., & Dolné, M. A. (1996). The relevance of action in perceiving affordances: Perception of catchableness of fly balls. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(4): 879-891.
- Ozubko, J. D., & MacLeod, C. M. (2010). The production effect in memory: Evidence that distinctiveness underlies the benefit. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 1543–1547.
- Paivio A. (1971). *Imagery and Verbal Processes*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Palmer, C., & Krumhansl, C. L. (1990). Mental representations for musical meter. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(4), 728-741.
- Parncutt, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms. *Music Perception*, 11, 409-464.
- Pashler, H. (1994). Dual-task interference in simple tasks: data and theory. *Psychological Bulletin*, 116(2), 220-244.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2005). The influence of metricality and modality on synchronization with a beat. *Experimental Brain Research*, 163(2), 226-238.
- Pazzaglia, M., Smania, N., Corato, E., & Aglioti, S. M. (2008). Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia. *The Journal of Neuroscience*, 28(12), 3030-3041.
- Pecher D, Zeelenberg R, Barsalou LW. (2003). Verifying properties from different modalities for concepts produces switching costs. *Psychological Science*, 14, 119-124.
- Pecher, D., Zeelenberg, R., & Barsalou, L. W. (2004). Sensorimotor simulations underlie conceptual representations: Modality-specific effects of prior activation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(1), 164-167.
- Peckel, M., Bigand, E. (in press). How does moving long to music influence its later recognition? *L'Année Psychologique*.
- Peckel, M., Pozzo, T., Bigand, E. (2014). The impact of the perception of rhythmic music on self-paced oscillatory movements. *Frontiers in Psychology*, 5, 1037.

- Pepping, G., & Li, F. (2000). Changing action capabilities and the perception of affordances. *Journal of Human Movement Studies*, 39(2): 115-140.
- Phillips-Silver, J., Aktipis, C. A., & Bryant, G. A. (2010). The ecology of entrainment: Foundations of coordinated rhythmic movement. *Music Perception*, 28, 3–14.
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2005). Feeling the beat: Movement influences infant rhythm perception. *Science*, 308(5727), 1430-1430.
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2007). Hearing what the body feels: Auditory encoding of rhythmic movement. *Cognition*, 105(3), 533-546.
- Phillips-Silver, J., & Trainor, L. J. (2008). Vestibular influence on auditory metrical interpretation. *Brain and Cognition*, 67(1), 94-102.
- Pijpers, J., Oudejans, R. R. D., & Bakker, F. C. (2007). Changes in the perception of action possibilities while climbing to fatigue on a climbing wall. *Journal of Sports Sciences*, 25(1), 97-110.
- Pizzamiglio L, Aprile T, Spitoni G, Pitzalis S, Bates E, D'Amico S et al (2005) Separate neural systems for processing action- or non-action-related sounds. *NeuroImage* 24(3):852–861
- Platz, F., & Kopiez, R. (2012). When the eye listens: A meta-analysis of how audio-visual presentation enhances the appreciation of music performance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 30(1), 71-83.
- Popescu, M., Otsuka, A., & Ioannides, A. A. (2004). Dynamics of brain activity in motor and frontal cortical areas during music listening: a magnetoencephalographic study. *Neuroimage*, 21(4), 1622-1638.
- Pozzo, T., Papaxanthis, C., Petit, J. L., Schweighofer, N., & Stucchi, N. (2006). Kinematic features of movement tunes perception and action coupling. *Behavioural Brain Research*, 169(1), 75-82.
- Pressing, J. (2002). Black Atlantic rhythm: Its computational and transcultural foundations. *Music Perception*, 19(3), 285-310.
- Prince, S. E., Daselaar, S. M., & Cabeza, R. (2005). Neural correlates of relational memory: successful encoding and retrieval of semantic and perceptual associations. *The Journal of Neuroscience*, 25(5), 1203-1210.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129-154.
- Proffitt, D. R. (2006). Embodied perception and the economy of action. *Perspectives on psychological science*, 1(2), 110-122.
- Pufall, P. B., & Dunbar, C. (1992). Perceiving whether or not the world affords stepping onto and over: A developmental study. *Ecological Psychology*, 4(1), 17-38.
- Pulvermüller, F. (2005). Brain mechanisms linking language and action. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 576-582.

- Pylyshyn, Z. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological Bulletin*, 80, 1-24.
- Pylyshyn, Z. (1984). *Computation and cognition*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Racette, A., & Peretz, I. (2007). Learning lyrics: To sing or not to sing ? *Memory and cognition*, 35(2), 242-253.
- Ramenzoni, V., Riley, M. A., Davis, T., Shockley, K., & Armstrong, R. (2008). Tuning in to another person's action capabilities: Perceiving maximal jumping-reach height from walking kinematics. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(4): 919-928.
- Ramenzoni V.C., Davis T.J., Riley M.A., & Shockley K. 2010. Perceiving action boundaries: Learning effects in perceiving maximum jumping-reach affordances. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 72(4): 1110-1119.
- Rankin, S. K., Large, E. W., & Fink, P. W. (2009). Fractal tempo fluctuation and pulse prediction. *Music Perception*, 26, 401–413.
- Regia-Corte, T., & Wagman, J. B. (2008). Perception of affordances for standing on an inclined surface depends on height of center of mass. *Experimental Brain Research*, 191(1), 25-35.
- Repp, B. H. (2001). Phase correction, phase resetting, and phase shifts after subliminal timing perturbations in sensorimotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 600–621.
- Repp, B. H. (2002a). Phase correction following a perturbation in sensorimotor synchronization depends on sensory information. *Journal of Motor Behavior*, 34, 291–298.
- Repp, B. H. (2002b). Automaticity and voluntary control of phase correction following event onset shifts in sensorimotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28, 410–430.
- Repp, B. H. (2003a). Rate limits in sensorimotor synchronization with auditory and visual sequences: the synchronization threshold and the benefits and costs of interval subdivision. *Journal of Motor Behavior*, 35, 355–370.
- Repp, B. H. (2003b). Phase Attraction in Sensorimotor Synchronization With Auditory Sequences: Effects of Single and Periodic Distractors on Synchronization Accuracy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 290-309.
- Repp, B. H. (2005). Rate Limits of On-Beat and Off-Beat Tapping With Simple Auditory Rhythms. *Music Perception*, 23(2), 165–187.
- Repp, B. H. (2006a). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969-992.

- Repp, B. H. (2006b). Does an auditory distractor sequence affect selfpaced tapping? *Acta Psychologica*, 121, 81-107.
- Repp, B. H. (2011). Comfortable synchronization of drawing movements with a metronome. *Human Movement Science*, 30, 18-39.
- Repp, B. H., & Doggett, R. (2007). Tapping to a very slow beat: A comparison of musicians and nonmusicians. *Music Perception*, 24(4), 367-376.
- Repp, B. H., & Keller, P. E. (2004). Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization: Effects of intention, attention, and awareness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57A, 499-521.
- Repp BH, Keller PE (2008). Sensorimotor synchronization with adaptively timed sequences. *Human Movement Science*, 27, 423-456.
- Repp, B.H. and Knoblich, G. (2004). Perceiving action identity: How pianists recognize their own performance. *Psychological Science*, 15, 604-609.
- Repp, B. H., & Knoblich, G. (2007). Action can affect auditory perception. *Psychological Science*, 18(1), 6-7.
- Repp, B. H., & Knoblich, G. (2009). Performed or observed keyboard actions affect pianists' judgements of relative pitch. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(11), 2156-2170.
- Repp, B. H., & Moseley, G. (2012). Anticipatory phase correction in sensorimotor synchronization. *Human Movement Science*, 31, 1118-1136.
- Repp, B. H., & Steinman, S. R. (2010). Simultaneous event-based and emergent timing: Synchronization, continuation, and phase correction. *Journal of Motor Behavior*, 42, 111-126.
- Repp, B. H., and Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403-452.
- Reybrouck, M. (2005). A biosemiotic and ecological approach to music cognition: Event perception between auditory listening and cognitive economy. *Axiomathes*, 15(2), 229-266.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Baron, R. M. 2007. Judging and actualizing intrapersonal and interpersonal affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(4): 845-859.
- Rizzolatti, G. (2005). The mirror neuron system and its function in humans. *Anatomy and embryology*, 210(5), 419-421.
- Rizzolatti, G., Camarda, R., Fogassi, L., Gentilucci, M., Luppino, G., Matelli, M. 1988. Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey II. Area F5 and the control of distal movements. *Experimental Brain Research*, 71, 491-507.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192.

- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3(2), 131-141.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 661-670.
- Rochat, P. (1995). Perceived reachability for self and for others by 3-to 5-year-old children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59(2): 317-333.
- Rodger, M. W., Craig, C. M., & O'Modhrain, S. (2012). Expertise is perceived from both sound and body movement in musical performance. *Human movement science*, 31(5), 1137-1150.
- Ross, B. H. (2009). *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol. 51. San Diego, CA: Academic Press.
- Rubin, D. C. (2006). The basic-systems model of episodic memory. *Perspectives on Psychological Science*, 1(4), 277-311.
- Ruby, P., Decety, J., (2001). Effect of subjective perspective taking during simulation of action: a PET investigation of agency. *Nature Neuroscience*, 4, 546-550.
- Ruby, P., & Decety, J. (2004). How would you feel versus how do you think she would feel? A neuroimaging study of perspective-taking with social emotions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(6), 988-999.
- Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013). Interactions between the nucleus accumbens and auditory cortices predict music reward value. *Science*, 340(6129), 216-219.
- Särkämö, T., Tervaniemi, M., Latinen, S., Forsblom, A., Soinila, S., Mikkonen, M., et al. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain*, 131, 866-876.
- Scheler, G., Lotze, M., Braitenberg, V., Erb, M., Braun, C., Birbaumer, N. (2001). Musician's brain: balance of sensorimotor economy and frontal creativity. *Society for Neuroscience Abstracts*, 27(1), 204.
- Schmuckler, M. A. (1996). Development of visually guided locomotion: Barrier crossing by toddlers. *Ecological Psychology*, 8(3), 209-236.
- Schneider, S., Schönle, P. W., Altenmüller, E., & Münte, T. F. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *Journal of neurology*, 254(10), 1339-1346.
- Schneider, S., Münte, T., Rodriguez-Fornells, A., Sailer, M., & Altenmüller, E. (2010). Music-supported training is more efficient than functional motor training for recovery of fine motor skills in stroke patients. *Music Perception*, 27, 271-280.
- Schubotz, R. I., & Von Cramon, D. Y. (2004). Sequences of abstract nonbiological stimuli share ventral premotor cortex with action observation and imagery. *The Journal of Neuroscience*, 24(24), 5467-5474.

- Schutz, M. (2008). Seeing music? what musicians need to know about vision. *Empirical Musicology Review*, 3(3), 83-108.
- Schütz-Bosbach, S., & Prinz, W. (2007). Perceptual resonance: action-induced modulation of perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(8), 349-355.
- Searle, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3, 417-424.
- Sedlmeier, P., Weigelt, O., & Walther, E. (2011). Music is in the muscle: How embodied cognition may influence music preferences. *Music Perception*, 28, 297-306.
- Senkfor, A. J., Van Petten, C., & Kutas, M. (2008). Enactment versus conceptual encoding: Equivalent item memory but different source memory. *Cortex*, 44(6), 649-664.
- Sevdalis, V., & Keller, P. E. (2011). Captured by motion: Dance, action understanding, and social cognition. *Brain and cognition*, 77(2), 231-236.
- Shapiro, L. (2010). *Embodied cognition*. New York, NY: Routledge Press.
- Shepard, R. N., & Cooper, L. A. (1986). *Mental images and their transformations*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of threedimensional objects. *Science*, 71, 701-703.
- Shiffrar, M. and Freyd, J.J. (1990) Apparent motion of the human body. *Psychological Science*, 1, 257-264
- Sievers, B., Polansky, L., Casey, M., & Wheatley, T. (2013). Music and movement share a dynamic structure that supports universal expressions of emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 70-75.
- Simmons-Stern, N. R., Budson, A. E., & Ally, B. A. (2010). Music as a memory enhancer in patients with Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 48(10), 3164-3167.
- Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, 303, 1157-1162.
- Sioros, G., Miron, M., Davies, M., Gouyon, F., & Madison, G. (2014). Syncopation creates the sensation of groove in synthesized music examples. *Frontiers in Psychology*, 5.
- Skinner, B. F. (1957). *Verbal behavior*. New York: Appleton-CenturyCrofts.
- Snyder, B. (2000). *Music and memory: an introduction*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Snyder, J., & Krumhansl, C. L. (2001). Tapping to ragtime: Cues to pulse finding. *Music Perception*, 18(4), 455-489.
- Snyder, J. S., Hannon, E. E., Large, E. W., & Christiansen, M. H. (2006). Synchronization and continuation tapping to complex meters. *Music Perception*, 24, 135-146.
- Spence, C., Nicholls, M. E., & Driver, J. (2001). The cost of expecting events in the wrong sensory modality. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 330-336.

- Stoffregen, T. A., Yang, C. M., Giveans, M. R., Flanagan, M., & Bardy, B. G. (2009). Movement in the perception of an affordance for wheelchair locomotion. *Ecological Psychology*, 21(1), 1-36.
- Sternberg, R. J. (2009). *Cognitive psychology (5th ed.)*. Belmont, CA: Wadsworth.
- Stevens, J. A., Fonlupt, P., Shiffrar, M. & Decety, J. (2000). New aspects of motion perception: Selective neural encoding of apparent human movements. *NeuroReport*, 11(1), 109–15.
- Stupacher, J., Hove, M. J., Novembre, G., Schütz-Bosbach, S., & Keller, P. E. (2013). Musical groove modulates motor cortex excitability: A TMS investigation. *Brain and cognition*, 82(2), 127-136.
- Strack, F., Martin, L. L., & Stepper, S. (1988). Inhibiting and facilitating conditions of the human smile: A nonobtrusive test of the facial feedback hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54, 768–777.
- Studenka, B. E. (2008). *Error correction timing behavior in tapping and circle drawing*. (Unpublished Ph.D. dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana).
- Styns, F., Van Noorden, L., Moelants, D., & Leman, M. (2007). Walking on music. *Human Movement Science*, 26, 769-785.
- Su, Y. H., & Jonikaitis, D. (2011). Hearing the speed: Visual motion biases the perception of auditory tempo. *Experimental Brain Research*, 214, 357–371.
- Su, Y. H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76(3), 373-382.
- Symes, E., Ellis, R., & Tucker, M. (2007). Visual object affordances: Object orientation. *Acta Psychologica*, 124(2), 238-255.
- Symons, C. S., & Johnson, B. T. (1997). The self-reference effect in memory: a meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 121(3), 371.
- Tettamanti, M., Buccino, G., Saccuman, M. C., Gallese, V., Danna, M., Scifo, P., ... & Perani, D. (2005). Listening to action-related sentences activates fronto-parietal motor circuits. *Journal of cognitive neuroscience*, 17(2), 273-281.
- Thaut, M. H., McIntosh, G. C., Rice, R. R., Miller, R. A., Rathbun, J., & Brault, J. M. (1996). Rhythmic auditory stimulation in gait training for Parkinson's disease patients. *Movement disorders*, 11(2), 193-200.
- Thaut, M. H., Leins, A. K., Rice, R. R., Argstatter, H., Kenyon, G. P., McIntosh, G. C., ... & Fetter, M. (2007). Rhythmic auditory stimulation improves gait more than NDT/Bobath training in near-ambulatory patients early poststroke: a single-blind, randomized trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 21(5), 455-459.
- Thaut, M. H., Abiru, M. (2010). Rhythmic Auditory Stimulation in rehabilitation of movement disorders: A review of the current research. *Music Perception*, 27, 263–269.

- Thompson, R. G., Moulin, C. J. A., Hayre, S., & Jones, R. W. (2005). Music enhances category fluency in healthy older adults and Alzheimer's disease patients. *Experimental aging research*, 31(1), 91-99.
- Todd, N. P. M. (1999). Motion in music: A neurobiological perspective. *Music Perception*, 17, 115-126.
- Todd, N. (2001). Evidence for a behavioral significance of saccular acoustic sensitivity in humans. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(1), 380-390.
- Todd, N. P., Cousins, R., & Lee, C. S. (2007). The contribution of anthropomorphic factors to individual differences in the perception of rhythm. *Empirical Musicology Review*, 2(1), 1-13.
- Todd, N. P. M., Lee, C. S., & O'Boyle, D. J. (2002). A sensorimotor theory of temporal tracking and beat induction. *Psychological Research/ Psychologische Forschung*, 66, 26-39.
- Todorov, E. (2004). Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neuroscience*, 7, 907-915.
- Toiviainen, P., Luck, G., & Thompson, M. R. (2010). Embodied meter: Hierarchical eigenmodes in music-induced movement. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 28(1), 59-70.
- Toiviainen, P., Snyder, J. (2003). Tapping to Bach: Resonance-based modeling of pulse. *Music Perception*, 21(1), 43-80.
- Tolman, E. C. (1932). *Purposive behavior in animals and men*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Torre, K., & Delignières, D. (2008a). Unraveling the finding of $1/f$ noise in self-paced and synchronized tapping: A unifying mechanistic model. *Biological Cybernetics*, 99, 159-170.
- Torre, K., & Delignières, D. (2008b). Distinct ways for timing movements in bimanual coordination tasks: The contribution of serial correlation analysis and implications for modeling. *Acta Psychologica*, 129, 284-296.
- Trainor, L. J., Wu, L., & Tsang, C. D. (2004). Long-term memory for music: Infants remember tempo and timbre. *Developmental Science*, 7(3), 289-296.
- Trainor LJ, Gao X, Lei J, Lehtovaara K, Harris LR. The primal role of the vestibular system in determining musical rhythm. *Cortex*, 45, 35-43.
- Tsay, C. J. (2013). Sight over sound in the judgment of music performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(36), 14580-14585.
- Tucker, M., & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 830-846.

- Tucker, M., & Ellis, R. (2004). Action priming by briefly presented objects. *Acta Psychologica*, 116, 185-203.
- Tulving, E. (1972). Episodic and semantic memory. In E. Tulving & W. Donaldson (Eds.), *Organization of memory* (pp. 381-403). New York: Academic Press.
- Tulving, E. (2002). Episodic memory: from mind to brain. *Annual review of psychology*, 53(1), 1-25.
- Umiltà, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C., et al. (2001). I know what you are doing. A neurophysiological study. *Neuron*, 31, 155–165.
- Umiltà, M. A., Escola, L., Intskirveli, I., Grammont, F., Rochat, M. J., Caruana, F., et al. (2008). When pliers become fingers in the monkey motor system. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, 105, 2209–2213.
- Valdesolo, P., Ouyang, J., & DeSteno, D. (2010). The rhythm of joint action: Synchrony promotes cooperative ability. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46, 693–695.
- Van Dyck, E., Maes, P. J., Hargreaves, J., Lesaffre, M., & Leman, M. (2013). Expressing induced emotions through free dance movement. *Journal of Nonverbal Behavior*, 37(3), 175-190.
- Van Dyck, E., Moelants, D., Demey, M., Deweppe, A., Coussement, P., & Leman, M. (2013). The impact of the bass drum on human dance movement. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 30(4), 349-359.
- van Noorden, L., & Moelants, D. (1999). Resonance in the perception of musical pulse. *Journal of New Music Research*, 28(1), 43-66.
- Varela, F. J. (1992). *The embodied mind: Cognitive science and human experience*. Cambridge, MA: MIT press.
- Varela, F. J. (1999). Present-time consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 6, 111–140.
- Varlet, M., Marin, L., Issartel, J., Schmidt, R. C., & Bardy, B. G. (2012). Continuity of visual and auditory rhythms influences sensorimotor coordination. *PLoS ONE*, 7, e44082.
- Verdaasdonk, B. W., Koopman, H. F. J. M., & Van Der Helm, F. C. (2006). Energy efficient and robust rhythmic limb movement by central pattern generators. *Neural Networks*, 19(4), 388-400.
- Vines, B. W., Krumhansl, C. L., Wanderley, M. M., Dalca, I. M., & Levitin, D. J. (2011). Music to my eyes: Cross-modal interactions in the perception of emotions in musical performance. *Cognition*, 118(2), 157-170.
- Wagenaar, R. C., & Van Emmerik, R. E. A. (2000). Resonant frequencies of arms and legs identify different walking patterns. *Journal of Biomechanics*, 33(7), 853-861.
- Wagman, J. B., & Malek, E. A. (2009). Geometric, kinetic-kinematic, and intentional constraints influence willingness to pass under a barrier. *Experimental Psychology*, 56(6): 409-417.

- Wanderley, M. M., & Depalle, P. (2004). Gestural control of sound synthesis. *Proceedings of the IEEE*, 92(4), 632–644.
- Warren, W. H. (1984) Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 10:683–703.
- Warren, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. *Advances in Psychology*, 50, 339-379.
- Warren, J.E., Sauter, D.A., Eisner, F., Wiland, J., Dresner, M.A., Wise, R.J., et al. (2006) Positive emotions preferentially engage an auditory-motor "mirror" system. *The Journal of Neuroscience*, 26, 13067-13075.
- Warren, W. H., & Whang, S. 1987. Visual guidance of walking through apertures: Body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13(3): 371-383.
- Watkins, K. E., Strafella, A. P., & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, 41(8), 989-994.
- Watson, J. B. (1930). *Behaviorism*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Weast J.A., Shockley K., & Riley M.A. 2011. The influence of athletic experience and kinematic information on skill-relevant affordance perception. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(4): 689-706.
- Wells, G. L., & Petty, R. E. (1980). The effects of overt head movements on persuasion: Compatibility and incompatibility of responses. *Basic and Applied Social Psychology*, 1, 219–230.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J.-P., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in my insula: The common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, 40, 655–664.
- Williams, L. E., & Bargh, J. A. (2008). Experiencing physical warmth promotes interpersonal warmth. *Science*, 322(5901), 606-607.
- Wilson, E. M., & Davey, N. J. (2002). Musical beat influences corticospinal drive to ankle flexor and extensor muscles in man. *International Journal of Psychophysiology*, 44(2), 177-184.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625-636.
- Wiltermuth, S. S., & Heath, C. (2009). Synchrony and cooperation. *Psychological Science*, 20, 1–5.
- Windsor, W. L., & de Bézenac, C. (2012). Music and affordances. *Musicae scientiae*, 16(1), 102-120.

- Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973b). The timing of interresponse intervals. *Perception and Psychophysics*, 13, 455–460.
- Witt, J. K. (2011). Action's effect on perception. *Current Directions in Psychological Science*, 20(3), 201-206.
- Witt, J. K., & Proffitt, D. R. (2005). See the ball, hit the ball apparent ball size is correlated with batting average. *Psychological Science*, 16(12), 937-938.
- Witt, J.K., Proffitt, D.R., & Epstein, W. (2005). Tool use affects perceived distance but only when you intend to use it. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31, 880–888.
- Wohlschläger, A. (2000). Visual motion priming by invisible actions. *Vision research*, 40(8), 925-930.
- Wohlschläger, A. and Koch, R. (2000). Synchronization error: an error in time perception. In Desain, P. & Windsor, L. (Eds.). *Rhythm perception and production*. (pp. 115–127). Lisse, The Netherlands: Swets and Zeitlinger.
- Wöllner, C., Deconinck, F. J. A., Parkinson, J., Hove, M. J., & Keller, P. E. (2012). The perception of prototypical motion: Synchronization is enhanced with quantitatively morphed gestures of musical conductors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38, 1390–1403.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882.
- Yang, S. J., Gallo, D. A., & Beilock, S. L. (2009). Embodied memory judgments: a case of motor fluency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(5), 1359.
- Yu, H., Russell, D. M., & Stenard, D. (2003). Task-effector asymmetries in a rhythmic continuation task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(3), 616.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(7), 547-558.
- Zwaan, R. A. (2009). Mental simulation in language comprehension and social cognition. *European Journal of Social Psychology*, 39, 1142–1150.
- Zwaan, R. A., & Taylor, L. J. (2006). Seeing, acting, understanding: Motor resonance in language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 1–11.
- Zwicker, J., Grosjean, M., & Prinz, W. (2008). A contrast effect between the concurrent production and perception of movement directions. *Visual Cognition*, 26, 953–978
- Zwicker, J., Grosjean, M., & Prinz, W. (2010). What part of an action interferes with ongoing perception?. *Acta psychologica*, 134(3), 403-409.

Annexes

Tracks List and Starting Points of 30-second Excerpts

#	Track	Artist	First 30s excerpt	Second 30s excerpt
			starting point	starting point
1	Miles Beyond	Mahavishnu Orchestra	01:15	00:39
2	Black Market	Weather Report	02:44	04:48
3	Chank	John Scofield	00:16	02:09
4	Chromazone	Mike Stern	04:14	00:16
5	Cosmic Strut	Mahavishnu Orchestra	01:56	00:47
6	Disco Connection	Isaac Hayes	02:21	01:51
7	Elegant People	Weather Report	00:08	03:00
8	Five G	Bill Bruford	00:14	01:21
9	Hang Up Your Hang Ups	Herbie Hancock	00:17	05:33
10	I Thought It Was You	Herbie Hancock	00:00	02:52
11	Le Lis	Billy Cobham	01 :40	00:00
12	Morning Sickness	Larry Coryell	01:54	00:01
13	Mr Spock	The Tony Williams Lifetime	01:00	03:56
14	Panhandler	Billy Cobham	00:23	02:16
15	Straphanging	Brecker Brothers	04:43	00:53
16	Stratus (Part II)	Billy Cobham	00:08	03:33
17	Swamp Rat	Herbie Hancock	00:17	03:59
18	The Way Of The Pilgrim	Mahavishnu Orchestra	00:32	01:30
19	Total Eclipse	Billy Cobham	03:41	04:26
20	Waveform	Billy Cobham	00:15	02:08

Composition of the six songs using Garage Band

Stimulus 1	Funky pop drum 08 Straight up beat 02 Classic Rock Steel 03 80s pop beat 07 Clave 03 Southern Rock Piano 05	Stimulus 2	Clave 03 Shaker 19 80s pop beat 07 Deep house dance beat 04 80S dance beat synth 03
Stimulus 3	Deep house dance beat 06 Spacey electric piano 01 Synth tone bass 03 Funky pop drum 01	Stimulus 4	Deep house dance beat 01 Upbeat electric piano 03 80s pop beat 10 Funky pop drum 08
Stimulus 5	Upbeat funk drums 03 Latin lounge piano 01 Shaker 19 Woody latin bass 08 Clave 03 Straight upbeat 02	Stimulus 6	Upbeat drums 04 Shaker 16 Round latin bass 05 Hip-hop beat 02 Hip-hop beat 01 Upbeat funk drums 01

Table of the criteria used to determine the different patterns

Pattern	Acceleration	Deceleration	No changes	Starting point	# of segments	Target
Acceleration	≥ 3 BPM	no	no	Anywhere	≥ 2	no
Start Adaptation	yes	yes	no	Baseline	2-5	Lower or Higher Metrical Level
Adaptation	no	yes	no	Anywhere	2-5	Lower Metrical Level
Metrical Change	no	yes	no	Metrical Level	2-5	Lower Metrical Level
Limit reached	yes	yes	no	Anywhere	3	no
Synchronization	yes	no	no	Anywhere	1-11	Metrical Level
Stable	no	no	yes	Anywhere	≤ 6	no
No Disruption	no	no	yes	Baseline	13	no