

L'APPRENTISSAGE IMPLICITE
DE SEQUENCES RYTHMIQUES MÉTRIQUES ET NON MÉTRIQUES

Benjamin G. Schultz

Introduction

L'apprentissage implicite (AI) a lieu de manière inconsciente, involontaire, et sans possibilité de verbalisation des connaissances (Shanks, 2005). Le développement d'attentes temporelles, est un mécanisme cognitif important pour la compréhension de nombreux comportements humains, comme la production et la perception de la musique, la danse et la parole. L'acquisition implicite de séquences temporelles (séquences d'évènements se succédant dans un temps donné) a fait jusqu'ici l'objet de peu d'études. De plus, les résultats des études sur l'AI de séquences rythmiques en l'absence de la présentation simultanée d'une séquence ordinale restent peu convaincants.

La thèse présentée ici, étudie les conditions dans lesquelles l'AI de séquences rythmiques se produit, ainsi que l'influence, par la facilitation ou l'inhibition de l'AI en la présence de paramètres du rythme musical comme la métrique. Les études qui ont montré l'AI de séquences rythmiques (Brandon, Tillmann, Stevens, & Terry, 2012) diffèrent de celles qui n'ont pas observé d'AI sur au moins trois aspects (Buchner & Steffens, 2001; Miyawaki, 2006; O'Reilly, McCarthy, Capizzi, & Nobre, 2008) :

Premièrement, les paradigmes utilisés sont différents. Plusieurs études parmi celles qui n'ont pas observé d'AI de séquences rythmiques en l'absence de la présentation simultanée d'une séquence ordinale (Buchner & Steffens, 2001; Miyawaki, 2006 ; O'Reilly et al., 2008; Shin, 2008; Shin & Ivry), ont utilisé une tâche de Temps de Réaction Sériel (TRS) à alternatives multiples (« Serial Reaction Task »). Dans la TRS, des stimuli sont présentés de manière séquentielle, selon une séquence répétée. Les participants doivent identifier chaque stimulus le plus rapidement et le plus précisément possible. L'identité du stimulus peut être, par exemple, un emplacement dans l'espace (cf. Shin & Ivry, 2002) ou une hauteur sonore (cf. Buchner & Steffens, 2001). L'apprentissage pendant la TRS peut être mis en évidence par une diminution des temps de réaction (TR) au cours de la présentation de blocs contenant chacun une séquence répétée. Généralement, les TR augmentent au cours de blocs de test contenant une nouvelle séquence ou une séquence aléatoire. Un retour au TR initial est observé lorsque la séquence d'origine est réintroduite (Cohen, Ivry, & Keele, 1990). Dans la TRS à réponses multiples (RM-TRS), la tâche principale est l'identification des stimuli. Le TR dépend non

seulement de l'identité du stimulus (c'est-à-dire une valeur dans la dimension ordinale) mais aussi de l'apprentissage de la séquence temporelle des stimuli (c'est-à-dire une valeur dans la dimension temporelle). Ainsi, même si les participants connaissent la séquence temporelle (c'est-à-dire qu'ils peuvent anticiper l'arrivée du stimulus), ils n'ont pas nécessairement de bonnes performances à la RM-TRS. En effet, la connaissance de la séquence temporelle peut ne pas lever l'incertitude sur l'identité du stimulus.

Les expériences démontrant un apprentissage temporel (c'est-à-dire de séquences temporelles) ont utilisé une tâche de Temps de Réaction Sériel à réponse unique (RU-TRS), consistant soit à détecter le début du stimulus, soit au rappel sériel de la séquence de stimuli (Karabanov & Ullén, 2008 ; Ullén & Bengtsson, 2003). L'utilisation d'une RM-TRS avec une séquence aléatoire ordinale a montré un AI de séquences temporelles dans une étude (Brandon et al., 2012) mais n'a pas permis de mettre en évidence l'AI de séquences temporelles dans une autre étude (O'Reilly et al., 2008). Pour explorer les conditions dans lesquelles l'AI de séquences temporelles est démontré, nous présentons une série d'expériences utilisant la RM-TRS (expériences 1, 2a, 3a et 3b), la RU-TRS (expériences 2a et 2b) et la tâche de rappel sériel (expériences 3a et 3b). De plus, nous testerons l'AI de séquences rythmiques en présence ou en l'absence d'une séquence ordinale simultanée (expériences 1, 2a, 2b et 3b).

Deuxièmement, les études ayant montré un AI de séquences temporelles ont utilisé des stimuli auditifs (Brandon et al., 2012; Salidis, 2001) et audiovisuels (Karabanov & Ullén, 2008). AI a été démontré que la synchronisation avec les événements temporels est plus précise avec des stimuli auditifs qu'avec des stimuli visuels (Patel, Iverson, Chen, & Repp, 2005). Ainsi, l'AI de séquences temporelles n'a peut-être pas été observée dans les études précédentes à cause de l'utilisation de stimuli visuels (Miyawaki, 2006 ; O'Reilly et al., 2008 ; Shin, 2008). Dans les expériences présentées ici, nous n'utiliserons que des stimuli auditifs.

Troisièmement, la plupart des études ayant montré un AI de séquences temporelles ont présenté les stimuli avec un intervalle fixe de temps entre le début de chaque stimulus (Inter Onset Interval ou IOI). Avec ce mode de présentation à IOI fixe, le « timing » des stimuli est indépendant du moment où les participants répondent (cf. Brandon et al, 2012 ; Karabanov & Ullén, 2008 ; Ullén & Bengtsson, 2003 ; Shin et Ivry, 2002, l'expérience 2). D'autres études ont utilisé un mode de présentation où il y a une relation entre le moment de la réponse des participants et le « timing » des stimuli. Ces études à intervalle fixe entre la réponse du participant et la présentation du stimulus (« Response-Stimulus Interval » ou RSI) n'ont pas montré d'AI temporelle (Buchner & Steffens, 2001; Miyawaki, 2006; Shin, 2008;

Shin & Ivry, 2002 ; mais voir Salidis, 2001). L'utilisation d'un RSI fixe implique que l'IOI (somme de RSI et TR) est variable, puisque le TR est lui-même variable. Avoir un IOI variable (par l'emploi d'un RSI fixe) plutôt qu'un IOI fixe pourrait induire une plus grande difficulté d'apprentissage. En résumé, les paradigmes à RSI pourraient rendre la formation d'attentes temporelles plus difficile que les paradigmes à IOI fixe. En conséquence, la thèse présente utilise des séquences rythmiques avec un IOI fixe, ceux-ci pourraient être caractéristiques des séquences rythmiques musicaux. L'utilisation de ce qui est connu sur le rythme musical nous a permis d'établir des prédictions sur la manière dont les séquences temporelles sont appris.

Rythme et métrique

Les séquences de sons basées sur un IOI fixe entrent dans la catégorie de ce qui est communément appelé le « rythme ». Le rythme est l'« organisation systématique de sons en termes de succession dans le temps (« timing »), d'accentuation, et de regroupement »¹ La métrique est une unité (d'un point de vue cognitif) qui peut être extraite à partir du rythme. La métrique est déterminée par la pulsation et le regroupement des subdivisions de la pulsation en ensembles réguliers (cf. London, 2004, voir **Figure 1**). Trois types de séquences rythmiques ont été utilisées dans la série d'expériences présentée ici : « fortement métriques » (strongly metrical, SM, voir par exemple : **Figure 1**), « faiblement métriques » (weakly metrical, WM) et « non métriques » (voir par exemple : Essens & Povel, 1985 ; Povel) Les séquences rythmiques sont SM, si des événements se produisent toujours sur le temps fort (c'est-à-dire le premier temps d'une mesure). Elles sont WM lorsque des événements ne surviennent pas toujours sur le temps fort, mais s'alignent souvent sur la pulsation ou sur temps faible. Une séquence rythmique est considérée comme non métrique si les événements s'alignent rarement sur la pulsation, ou sur les temps forts. Des exemples de rythmes SM, WM, et non métriques sont présentés dans la **Figure 1**.

1 « systematic patterning of sound in terms of timing, accent, and grouping »

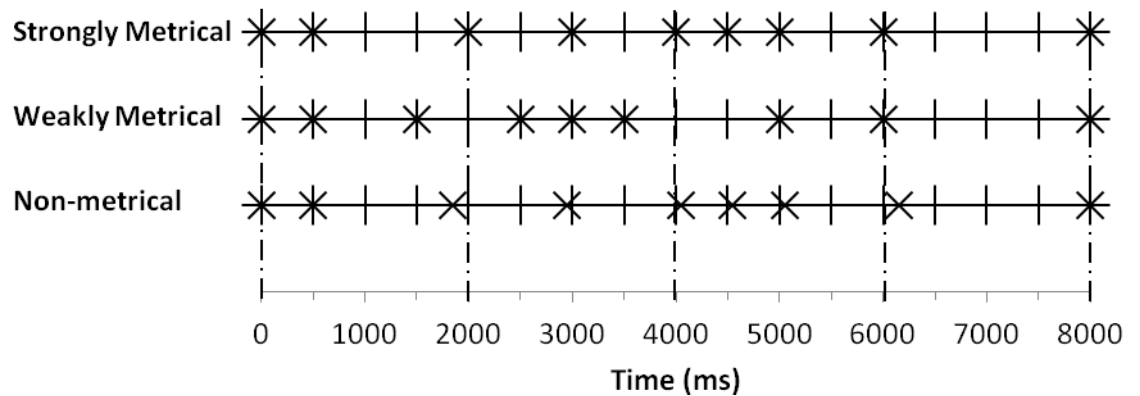


Figure 1. Pulsation (ligne verticale pleine), temps fort (ligne verticale pointillée), et événement (croix) d'une séquence rythmique fortement métrique (« Strongly Metrical » ou SM), faiblement métrique (« Weakly Metrical » ou WM) et non métrique (« Non-metrical »).

La Théorie de l'attention dynamique et une hypothèse du liage métrique

La théorie de l'attention dynamique (« *dynamic attending theory* » ou DAT, cf. Jones & Boltz, 1989) concerne la manière dont se forment les attentes temporelles. La DAT suppose que le niveau d'attention oscille au cours du temps et que la fréquence d'oscillation de ce niveau attentionnel s'adapte en se synchronisant aux régularités temporelles des événements externes présentés (c'est-à-dire les stimuli). Ce processus est appelé « entraînement » et correspond à une forme d'apprentissage. L'apparition périodique d'événements dans une structure rythmique peut induire un entraînement, et donc augmenter le niveau d'anticipation des événements, lorsque ceux-ci sont temporellement alignés avec la structure métrique. L'hypothèse de liage métrique (« *metric binding hypothesis* » ou MBH ; Jones, 2009) est une extension de la DAT qui se rapporte à la façon dont la métrique est apprise lors de l'exposition au rythme. Alors que la DAT se rapporte à une seule attente à un moment donné (Jones, 2009, p. 83), la MBH postule plusieurs attentes simultanées à un instant donné. A chaque attente correspond un oscillateur de la MBH. Avec l'entraînement, ces oscillateurs se « regroupent » les uns avec les autres (groupement rythmique) pour former des « grappes métriques » (ou « cluster métriques », Jones, 2009, p. 84). Ces grappes métriques sont donc constituées de plusieurs oscillateurs associés les uns aux autres selon des échelles de temps différentes. Elles renforcent l'attention pour chaque niveau métrique associé à un oscillateur de la grappe (c'est-à-dire le niveau d'attention dans le temps pour les événements alignés avec ces métriques). Avec une exposition répétée à une séquence

rythmique (qui est externe) et avec un entraînement (qui est interne), un « cadre métrique », ou structure métrique, peut alors se former (Large & Jones, 1999). De cette façon, les régularités temporelles activent des oscillateurs qui guident l'attention vers des événements des métriques associées à chaque oscillateur (pulsation ou temps forts).

Lorsqu'une structure rythmique est établie, l'attention peut être momentanément perturbée si un événement n'est pas aligné sur cette structure, sans que cela modifie notablement la perception de la structure rythmique. Ceci est dû à une forme d'inertie perceptive liée à la présence des oscillateurs décrits dans la DAT et de la MBH. En se basant sur la DAT et MBH, nous pouvons formuler l'hypothèse que les séquences fortement (SM) et faiblement métriques (WM) peuvent être plus facilement apprises que les séquences non-métriques. Une autre hypothèse dérivée de ces deux théories est qu'après une exposition à une séquence métrique SM, l'introduction d'une nouvelle séquence WM diminue les performances contrairement au cas où cette nouvelle séquence conserve la structure rythmique d'origine, donc que cette nouvelle séquence est aussi SM. Une telle différence de performance n'était pas envisagée pour les séquences non-métriques pour la raison que le phénomène d'entraînement ne peut apparaître lors de l'exposition à de tels séquences (voir les expériences 2b, 3a et 3b).

L'utilisation de la Procédure de dissociation des processus pour l'évaluation d'un apprentissage implicite

Afin de s'assurer que l'apprentissage est implicite dans un paradigme à TRS (et une tâche de rappel sériel), des versions modifiées de la procédure de dissociation des processus (« *process dissociation procedure* », Jacoby, 1991) ont été utilisées. Cette procédure est une méthode d'évaluation de l'AI qui ne prend pas en considération la « pureté » des processus cognitifs (c'est-à-dire l'hypothèse selon laquelle les performances à une tâche donnée dépendent d'un seul processus cognitif ; voir Shanks & St. John, 1994). Dans cette procédure, les participants effectuent une tâche avec deux instructions différentes : une instruction d'inclusion et une instruction d'exclusion. Pour suivre une instruction d'inclusion, les participants doivent faire appel aux connaissances acquises pendant l'expérience, alors que pour une instruction d'exclusion, les participants doivent s'efforcer d'oublier ce qu'ils ont appris (par exemple en complétant des racines de mots avec des mots différents de ceux appris lors de la phase d'apprentissage, cf. Jacoby, Toth, & Yonelinas, 1993). Alors qu'avec l'instruction d'inclusion les répliques des séquences sont facilitées à la fois par des processus explicites et implicites, les suppressions des répliques en accord avec

l'instruction d'exclusion, sont facilitées par des processus explicites mais sont perturbées par les processus implicites. Ainsi, la différence de performance entre les deux instructions donne des indications sur la contribution des processus implicites et explicites lors de l'AI (avec un paradigme à TRS et une tâche de rappel sériel). Dans cette thèse, deux tâches ont été utilisées : une tâche de génération (pour toutes les expériences) et une tâche de reconnaissance (pour les expériences 1 et 2a). Ces deux tâches ont été soumises à la procédure de dissociation des processus (instruction inclusive et exclusive). Ces tâches ont été demandées après une phase d'apprentissage (ou « d'exposition ») d'une séquence rythmique (créant un « modèle de formation ») pendant que les participants effectuaient une TRS avec une tâche de rappel sériel.

Tâche de génération

Dans la tâche de génération (Karabanov & Ullén, 2008), les participants devaient reproduire la séquence rythmique (instruction d'inclusion) ou en créer une nouvelle (instruction d'exclusion). Les séquences produites avec chaque instruction ont ensuite été comparées à celles apprises dans le paradigme à TRS, en utilisant un score de similarité qui reflète le degré de ressemblance des séquences produites avec celles de la phase d'apprentissage. Un score de similarité obtenu avec l'instruction d'inclusion inférieur ou égal au score de similarité obtenu avec l'instruction d'exclusion, indique l'absence de connaissances (déclaratives) de la séquence d'exposition et donc un apprentissage implicite. En revanche, un score de similarité avec l'instruction d'inclusion supérieur à celui obtenu avec l'instruction d'exclusion suggère un apprentissage explicite.

Tâche de reconnaissance

Des tests de reconnaissance ont été utilisés avec la procédure de dissociation des processus (cf. Destrebecqz & Cleeremans, 2001, 2003) afin de déterminer si les participants ont une connaissance explicite des séquences d'exposition. Ces tâches de reconnaissance consistent à présenter aux participants des fragments de séquence dont certaines sont issues de la phase initiale d'exposition (c'est-à-dire de blocs d'apprentissage) et d'autres sont issues de séquences de distraction qui n'ont pas été préalablement présentées. Les participants doivent indiquer s'ils reconnaissent les séquences ou fragments de séquences. Si les participants sont capables d'identifier les séquences d'origine et de rejeter les séquences de distraction avec une performance supérieure au hasard, on considère alors qu'ils ont eu une connaissance explicite des séquences de la phase d'exposition. Buchner et ses collègues

(Buchner & Steffens, 2001; Buchner, Steffens, Erdfelder, & Rothkegel, 1997 ; Buchner, Steffens, & Rothkegel, 1998) ont adapté cette tâche de reconnaissance en se basant sur le « modèle de mesure d'identification d'une séquence » (*Sequence Identification Measurement Model* ou SIMM). Le SIMM a pour but de séparer les réponses venant d'une authentique reconnaissance d'une séquence apprise, des réponses liées à la d'une détection de régularités ou de l'absence d'une structure, de manière à distinguer une reconnaissance consciente (explicite), d'une reconnaissance inconsciente (implicite). Le SIMM et l'adaptation de la tâche de reconnaissance a été validée avec succès lors d'une série d'expériences (Buchner et al., 1997 ; 1998). Une version adaptée du SIMM (avec un post-test de reconnaissance comprenant un paramètre permettant de détecter le « degré de métricité ») a été utilisée dans les expériences 2a et 2b. Cette adaptation a permis d'évaluer le niveau de contribution de la fluidité perceptive (supposée refléter l'apprentissage implicite) lors de la reconnaissance des séquences.

Hypothèses générales

Nous avons posé les hypothèses suivantes : (i) Les séquences métriques et non métriques peuvent être appris de manière implicite, (ii) l'AI de séquences métriques et non métriques peut se produire en présence (expérience 3a) ou en l'absence (expériences 1, 2a, 2b et 3b) d'une séquence ordinale simultanée. Toutefois, l'AI peut ne pas être évident en l'absence d'une séquence ordinal dans un paradigme à TRS (expériences 1, 2a, 3a et 3b). Les séquences métriques sont plus facilement apprises que les séquences non métriques.

Une dernière hypothèse, formulée dans le cadre de cette thèse, est qu'après l'apprentissage par exposition à une séquence fortement métrique (SM), les performances vont diminuer lors de la présentation d'un rythme WM (séquence faiblement métrique). Donc l'introduction en phase de test, d'une nouvelle séquence faiblement métrique (WM) devrait faire davantage diminuer les performances que l'introduction d'une nouvelle séquence au degré de métricité équivalent à la métrique initiale (nouvelle condition métrique, SM, voir expériences 2a à 3b). Cette différence de performance n'est pas attendue si la séquence initial d'exposition est non métrique car, dans ce cas, aucun liage métrique ne peut avoir lieu lors de la phase d'apprentissage.

Expériences

Les expériences suivantes ont été compilées pour trois publications: les expériences 2a et 2b pour un manuscrit accepté pour le *Quarterly Journal of Experimental Psychology*.

Le second manuscrit comportant une analyse sur séquence utilisant les données de reconnaissance d'expérience 2b, ainsi que deux autres manuscrits basés sur les expériences 3a et 3b sont en préparation pour deux publications.

Expérience 1

Pour l'expérience 1 l'apprentissage de séquences métriques et non-métriques a été comparé en utilisant une RM-TRS. Des séquences de syllabes (/Pa/, /Ka/, ou /Ta/) ont été présentées et les participants devaient identifier chaque syllabe aussi vite et précisément que possible. L'ordre des syllabes était aléatoire, mais elles étaient organisées en rythmes métriques et non-métriques. Ces rythmes sont présentés en figure 2.

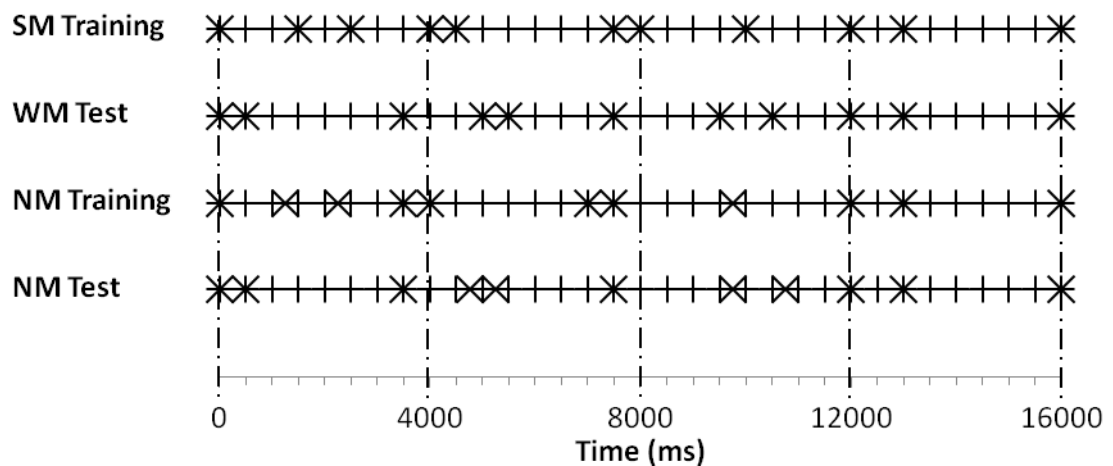


Figure 2. Séquences rythmiques utilisées dans l'expérience 1. X : événement, ligne verticale pointillée : temps fort, ligne verticale pleine : pulsation.

Le degré de métricité (métrique, non métriques) était une variable inter-sujets. Les séquences ont été présentées en six blocs : quatre blocs d'apprentissage (blocs 1 à 4) et deux blocs de test (blocs 5 et 6). Les blocs d'apprentissage présentaient la séquence rythmique à apprendre qui était métrique ou non métrique (**Figure 2**). Le bloc de test n°5 présentait une nouvelle séquence rythmique qui était soit WM (en « condition métrique ») soit non métrique (en « condition non métrique ») (**Figure 2**). Le bloc de test n°6 réintroduisait la séquence rythmique d'apprentissage (présentée aux blocs 1 à 4). Le bloc était une variable intra-sujet (à six niveaux : bloc 1 à 6) (**Figure 2**). Selon l'une de nos hypothèses, les séquences métriques amélioreraient le temps de réponse (réduction du TR) lors de la présentation des blocs d'apprentissage plus fortement que les séquences non métriques, bien qu'il y ait apprentissage

avec ces deux types de séquence rythmique. Contrairement à cette hypothèse, aucun apprentissage n'a été observé et il n'y avait donc aucune différence d'apprentissage entre ces deux types de séquence rythmique.

Cette absence d'apprentissage avec des séquences métriques et non métriques peut être expliquée de deux façons. La première est que les rythmes présentés étaient trop lents pour permettre aux participants d'apprendre les régularités temporelles de ces rythmes (les intervalles étant compris entre 500 ms et 3000 ms). La seconde est que l'incertitude (probabiliste) sur l'identité des stimuli pourrait avoir empêché l'apprentissage. Autrement dit, l'ordre des stimuli étant aléatoire, les participants n'arrivaient pas à prédire la réponse correcte au stimulus suivant, même s'ils pouvaient anticiper la séquence rythmique. L'objet de l'expérience 2 a donc été d'examiner comment l'apprentissage d'une telle séquence temporelle probabiliste (incluant donc une incertitude sur l'identité du stimulus suivant) est influencé par le degré d'incertitude, en comparant les résultats d'un paradigme à RM-TRS avec ceux d'un paradigme à RU-TRS et en utilisant des rythmes plus rapides que dans l'expérience 1.

Expérience 2a

L'expérience 2a a comparé l'AI de séquences rythmiques dans un paradigme à RM-TRS avec l'AI dans un paradigme à RU-TRS. Les stimuli étaient des ondes triangulaires d'une fréquence de 394Hz et d'une durée de 200ms présentées soit dans l'écouteur gauche du casque, soit dans celui de droite ou simultanément dans les deux. Ces stimuli ont été utilisés pour toutes les expériences suivantes. Le groupe de participants affecté au paradigme RM-TRS, devait identifier si le stimulus provenait de l'écouteur gauche, droit, ou des deux écouteurs. Le groupe de participants affecté au paradigme RU-TRS devaient répondre à l'arrivée du son aussi rapidement que possible, mais n'avait pas à le localiser. Les rythmes utilisés dans l'expérience 2a sont présentés en **Figure 3**. Ces rythmes avaient un tempo plus rapide que dans l'expérience 1.

Si l'incertitude probabiliste perturbe l'apprentissage de la séquence temporelle, l'apprentissage devrait être plus faible avec le paradigme à RM-TRS qu'avec le paradigme à RU-TRS. Pour ces deux paradigmes, une séquence métrique (SM) a été présentée lors des blocs d'apprentissage (blocs 1 à 5). Pour nos hypothèses, émergeant de la DAT et de la MBH, deux blocs de test (blocs 6 et 8) ont été utilisés: un bloc SM, avec une séquence différente des blocs d'apprentissage mais du même degré de métricité, et un bloc WM où le degré de métricité était plus faible que celui de la séquence initiale d'apprentissage. L'ordre d'assignation de ces deux conditions métriques aux blocs 6 et 8 était contrebalancé entre les

participants. La séquence rythmique d'apprentissage était réintroduite dans les blocs 7 et 9. Selon la DAT et la MBH, après apprentissage de la séquence SM (fortement métrique) initiale (blocs 1 à 5), l'introduction d'une nouvelle séquence SM devrait se traduire par une faible augmentation du TR (c'est-à-dire une baisse moins marquée des performances comparé à l'introduction du rythme WM). Les résultats ont montré un apprentissage avec le paradigme RU-TRS, mais pas d'apprentissage avec le paradigme RM-TRS. Cette différence suggère que l'incertitude probabiliste (sur l'identité du stimulus suivant) peut perturber l'apprentissage de la séquence temporelle.

La tâche de génération post-test a indiqué que l'apprentissage était implicite. En effet, il n'y avait pas de différence de performance entre une instruction d'inclusion et une instruction d'exclusion. Pour le paradigme RU-TRS, l'augmentation du TR était significativement plus élevée lors du bloc de test présentant une séquence rythmique WM que lors du bloc de test présentant une nouvelle séquence SM. Interprété du point de vue de la DAT et de la MBH, ce résultat suggère que les oscillateurs attentionnels ont pu focaliser l'attention sur des points intermittents. Lorsque le degré de métricité était maintenu, l'attente du stimulus suivant était moins perturbée par la présentation d'une nouvelle séquence temporelle que par la présentation d'une séquence temporelle d'un degré métrique moindre. Afin de s'assurer que cette différence de performance est bien due au liage métrique (conformément à la MBH), une comparaison entre une condition métrique et une condition non métrique était nécessaire. Cette comparaison faisait l'objet de l'expérience 2b.

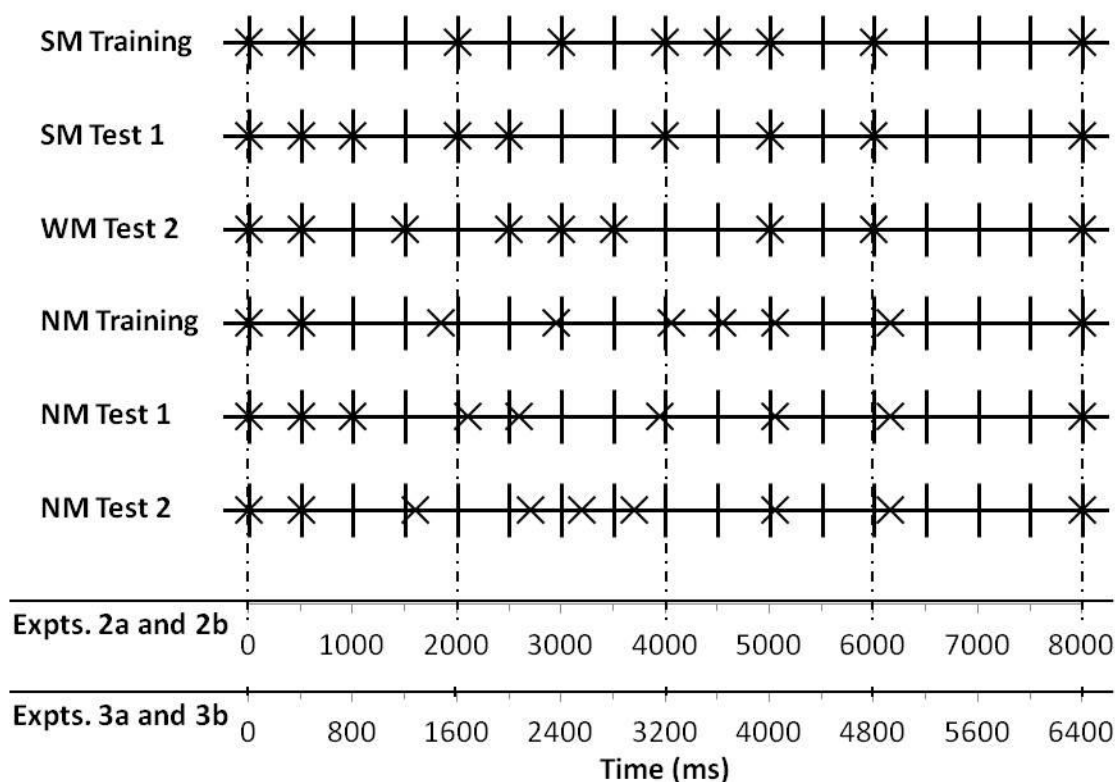


Figure 3. Séquences rythmiques utilisés dans les expériences 2a à 3b. X : événement, ligne verticale pointillée : temps fort; ligne verticale pleine : pulsation. Bien que les intervalles temporels relatifs étaient les mêmes pour les expériences 2a à 3b, le tempo plus lent dans expériences 2a et 2b que dans les expériences 3a et 3b.

Expérience 2b

Pour l'expérience 2b, l'AI de séquences métriques et non métriques a été comparé en utilisant un paradigme à RU-TRS. Cette expérience a été faite pour vérifier que la différence de performance entre les blocs de test SM et WM était due au liage métrique, telle que prédite par la DAT et la MBH. Des séquences rythmiques métriques et non métriques ont été présentées dans les blocs d'apprentissage. Deux blocs de test ont été utilisés. Dans la « condition métrique », le bloc d'apprentissage était SM, le bloc de test était SM et le bloc de test 2 était WM. Dans la « condition non métrique », les blocs d'apprentissage, ainsi que pour les tests 1 et 2 étaient des versions non-métriques des séquences métriques de test. Pour la condition non métrique, les séquences d'entraînement et les séquences de tests 1 et 2 étaient des versions non métriques des séquences métriques : elles contenaient des IOIs avec des ratios complexes, résultant dans des déviations temporelles non-métriques pour des intervalles longues (voir Figure 3). Le tempo utilisé pour l'expérience 2b est le même que

dans l'expérience 2a). Cela signifie que les séquences métriques et non métriques étaient comparables en termes de complexité rythmique.

Selon notre hypothèse, ces rythmes métriques et non métriques pouvaient être appris de manière implicite. Sur la base de la DAT, nous avons prédit que les séquences métriques seraient plus facilement apprises que les non métriques. Notre hypothèse était que, si dans la condition métrique, une augmentation du TR devrait être observée entre les blocs de test SM et WM (indiquant ainsi un regroupement), dans la condition non métrique (où il n'y a pas d'oscillateurs possibles), il ne devrait pas y avoir de liage et donc pas de différence de performance entre les blocs de test 1 et 2.

Les résultats de l'expérience 2b ont montré un apprentissage implicite des séquences métriques et non métriques. Contrairement à notre hypothèse, la séquence métrique n'a pas été apprise plus facilement que la séquence non métrique. Cependant, un liage métrique est suggéré par une augmentation plus forte du TR lors de la présentation du bloc WM (bloc de test 2) que lors de la présentation du bloc SM (bloc de test 1). Dans la condition non métrique, aucune différence n'a été observée entre les blocs de test 1 et 2. Ces résultats indiquent qu'un liage métrique est survenu dans la condition métrique. Les résultats de la tâche de génération ont indiqué que l'apprentissage des rythmes métriques et non métriques était implicite car il n'y avait pas de différence du score de similarité entre les instructions d'inclusion et d'exclusion.

Deux raisons possibles peuvent expliquer l'absence de différence d'IL, pour les blocs d'apprentissage, entre les séquences métriques et non métriques. Premièrement, il est possible que les participants aient été capables de s'adapter aux déviations temporelles de la séquence non métrique. Il existe, en effet, des données suggérant la possibilité d'une synchronisation à des séquences temporelles contenant des variations de phase et de tempo au sein d'une structure rythmique (Large, Kelso, et Fink, 2002). Il serait possible que les déviations temporelles des séquences non métriques par rapport aux séquences métriques aient été perçues comme des fluctuations de phase et de tempo par rapport à ces dernières. Ainsi, il pourrait exister un mécanisme d'adaptation, activé lors de l'apprentissage d'une séquence non métrique, destiné à compenser des déviations temporelles lorsqu'elles sont prévisibles rythmiquement. Deuxièmement, les études, qui ont constaté des différences d'apprentissage entre des séquences métriques et non métriques, ont généralement utilisé des tâches de reproduction (voir Grahn & Brett, 2007). Il est possible que ces différences de performances entre les séquences métriques et non métriques soient plus marquées lorsque la tâche donnée

implique l'activation de processus mnésiques d'encodage et de récupération, comme dans une tâche de reproduction (voir expériences 3a et 3b).

Adaptation du modèle de mesure d'identification de séquences (SIMM)

La tâche de génération des expériences 2a et 2b indiquait que l'apprentissage des séquences métriques était implicite. Il n'y avait pas de différence de performance entre l'instruction d'inclusion et d'exclusion. Afin d'effectuer une évaluation complémentaire de l'IL, les données de la tâche de reconnaissance des expériences 2a et 2b ont été analysées à l'aide d'un SIMM adapté². Ce SIMM adapté permet d'évaluer le niveau de contribution de processus conscients et inconscients pour la reconnaissance de séquences apprises dans un paradigme à TRS. Le SIMM ne met en évidence que les processus inconscients, et cela avec l'hypothèse sous-jacente que la fluidité perceptive reflète ces processus inconscients. Cette hypothèse est controversée car certains chercheurs affirment que la fluidité perceptive n'est pas nécessairement spécifique à l'AI (Shanks & Johnstone, 1999). Le SIMM a été utilisé pour tester s'il existe une différence entre l'AI (tel que suggérée par la tâche de génération) et la fluidité perceptive (tel que suggérée par la tâche de reconnaissance).

Dans l'expérience 2a, le SIMM a indiqué que, pour les rythmes métriques, des processus inconscients tels que la fluidité perceptive, ont davantage contribué aux jugements de reconnaissance que des processus conscients. Lors de l'expérience 2b au contraire, le SIMM a indiqué des contributions équivalentes des processus conscients et inconscients pour la reconnaissance des séquences métriques. Il y a donc une contradiction entre les résultats du test de génération, indiquant un AI dans les expériences 2a et 2b et les résultats du SIMM, n'indiquant un AI que dans l'expérience 2a. L'ensemble de ces résultats suggère que la fluidité perceptive pourrait refléter un processus différent de l'IL, conclusion en accord avec celle de Shanks et Johnstone (1999) qui ont suggéré que la fluidité perceptive n'offre pas de preuve d'une connaissance spécifiquement implicite.

2 Comme aucun d'apprentissage n'a été observé avec un paradigme à RM-TRS dans l'expérience 2a, les données correspondantes n'ont pas été présentées.

Expérience 3a

Afin de tester si la différence d'AI entre des séquences métriques et non métriques est plus importante lorsque des processus mnésiques d'encodage et de récupération sont activés (c'est-à-dire en utilisant une tâche de reproduction) que dans un paradigme contenant une tâche en temps-réel (ici un paradigme à TRS), une tâche de rappel sériel a été utilisée dans les expériences 3a et 3b. Ces expériences ont testé l'AI de séquences métriques et non métriques en présence d'une séquence simultanée ordinale. Une tâche de rappel sériel a été utilisée dans un paradigme à TRS pour tester l'apprentissage, et une tâche de génération post-test a été employée pour tester si l'apprentissage était implicite. Les séquences temporelles étaient les mêmes que ceux des expériences 2a et 2b mais produits avec des intervalles plus courts (voir **Figure 3**). La séquence ordinale consistait en la présentation de sons venant de l'écouteur gauche, droit, ou des deux écouteurs. Chaque essai demandait une TRS suivit d'une tâche de rappel sériel. Pour la TRS, les participants entendaient une séquence ordinale présentée avec une séquence rythmique et devaient identifier l'emplacement spatial de la source sonore (écouteur gauche, droit, ou les deux écouteurs).

Immédiatement après la tâche TRS, les participants devaient effectuer la tâche de rappel sériel, consistant à reproduire, aussi précisément que possible, la séquence à partir de laquelle ils avaient effectué la TRS qui avait été précédemment présentée. Les participants n'étaient pas préalablement informés que les séquences ordinales et les séquences rythmiques étaient les mêmes à chaque essai des blocs d'apprentissage. Lors de la réalisation de la tâche de rappel sériel, la diminution du nombre d'erreurs de localisation au cours des essais devait indiquer un apprentissage de la séquence ordinale. Une diminution d'erreurs de synchronisation au cours des essais devait indiquer un apprentissage de la séquence rythmique. L'apprentissage des séquences indépendamment l'une de l'autre a fait l'objet de blocs de tests. Lors d'un bloc de test ordinal, une nouvelle séquence ordinale a été présentée. L'augmentation du nombre d'erreurs devait indiquer un apprentissage de la séquence ordinale, indépendamment de la séquence rythmique. L'apprentissage de la séquence rythmique a été testée avec deux blocs de tests (test 1 et test 2) ; en condition métrique (test 1 : séquence SM et test 2 : séquence WM) et non métrique (test 1 : séquence non métrique et test 2 : nouvelle séquence non métrique, voir **Figure 3**). Dans la condition métrique, l'augmentation d'erreurs de synchronisation entre les blocs d'apprentissage et les blocs de test, devaient indiquer un apprentissage de la séquence rythmique (indépendamment de la séquence ordinale). Selon nos hypothèses, l'augmentation des erreurs devait être plus grande avec la séquence WM

qu'avec la séquence SM. En revanche, en condition non métrique nous prédisions l'absence de variation entre les blocs de test 1 et 2.

Les résultats suggèrent que les séquences ordinales et rythmiques ont été apprises simultanément et de manière indépendante. Seule la séquence rythmique a été apprise de manière implicite (la séquence ordinale a été apprise de manière explicite). Nos résultats indiquent également, qu'au cours des blocs d'apprentissage, la séquence métrique a été apprise plus facilement que la séquence non métrique. De plus, lors de la présentation des blocs d'apprentissage, la diminution des erreurs de jugement ordinal était plus importante avec la séquence métrique qu'avec la séquence non métrique. Nos résultats suggèrent enfin qu'un groupement rythmique a eu lieu, puisque les erreurs de synchronisation étaient plus importants à la présentation du bloc de test WM qu'avec celle du bloc de test SM. La présence concomitante d'une séquence rythmique et d'une séquence ordinale semble avoir favorisé l'apprentissage de ces deux séquences car l'amélioration des performances au cours des blocs d'apprentissage était plus importante en condition métrique qu'en condition non métrique. Afin de confirmer qu'une séquence rythmique peut être apprise indépendamment d'une séquence ordinale, l'expérience 3b a testé l'AI de séquences métriques et non métriques, en l'absence d'une séquence ordinale en présentant une séquence ordinale aléatoire.

Expérience 3b

L'expérience 3b a testé l'AI de séquences métriques et non métriques en utilisant une séquence ordinale aléatoire. Les participants ont été exposés à des blocs d'apprentissage métriques ou non métriques (voir expérience 2b). Le paradigme et les stimuli étaient semblables à ceux utilisés dans l'expérience 3a à l'exception : (1) de la séquence ordinale qui, pour la présente expérience, était aléatoire d'un essai à l'autre et (2) du bloc de test ordinal qui, pour la présente expérience, a été remplacé par un deuxième bloc de test rythmique. Dans la condition métrique, une séquence SM était présentée dans le bloc de test 1 puis une séquence WM dans le bloc de test 2. Dans la condition non métrique, les blocs de test 1 et 2 étaient des versions non métriques des blocs de test 1 et 2 de la condition métrique (voir expérience 2b). L'absence de séquence ordinale (favorisant éventuellement l'apprentissage) implique que la diminution des erreurs de synchronisation ne pouvait être attribuée qu'à un apprentissage de la séquence rythmique.

En accord avec de précédentes études (Karabanov & Ullén, 2008 ; Ullén & Bengtsson, 2003 ; et expérience 2b), la tâche de rappel sériel a indiqué un apprentissage de la séquence métrique et d'une séquence non métrique en l'absence d'une séquence ordinale

concomitante. En revanche, la TRS a montré un absence d'apprentissage (résultat en accord avec celui de l'expérience 2a). Selon la tâche de génération, les séquences métriques et non métriques ont été apprises de manière implicite. Contrairement à notre hypothèse, l'apprentissage de la séquence métrique n'a pas été plus facile que celui de la séquence non métrique. Pourtant, il est probable qu'un liage métrique ait eu lieu dans la condition métrique car l'augmentation des erreurs de synchronisation était marginalement significativement plus grande avec le bloc de test WM qu'avec le bloc de test SM.

Conclusion

L'apprentissage implicite de séquences rythmiques a été testé avec cinq expériences et une analyse basée sur la modélisation. Les résultats des expériences 1, 2a et 3b suggèrent que l'apprentissage d'une séquence rythmique est perturbé dans un paradigme à RM-TRS lorsque l'identité du stimulus suivant est incertaine. Cette conclusion indique que l'utilisation de la RU-TRS (Salidis, 2001) et de la tâche de rappel sériel (Karabanov & Ullén, 2008; Ullén & Bengtsson, 2003) sont des approches plus sensibles pour détecter l'AI de séquences temporels en l'absence d'une séquence ordinal. De plus, ces résultats suggèrent qu'un apprentissage de séquences rythmiques peut avoir lieu indépendamment de l'apprentissage d'une séquence ordinaire concomitante, ce qui est en accord avec nos hypothèses basées sur de précédentes études (Buchner & Steffens, 2001; O'Reilly et al., 2008; Shin & Ivry, 2002).

Les expériences 2a et 2b suggèrent un AI de séquences métriques et non métriques dans un paradigme à RU-TRS (tel que celui utilisé par Salidis, 2001). Bien qu'il n'y ait aucune différence entre les taux d'apprentissage de séquences métriques et non métriques, les différences de performances entre les blocs de test SM et WM étaient nettes en condition métrique, contrairement aux conditions non métriques. Ces résultats indiquent qu'un apprentissage de la métrique a eu lieu lorsque les événements se sont produits de manière périodique, ce qui est en accord avec l'hypothèse d'oscillateurs attentionnels multiples de la MBH s'adaptant aux périodicités multiples d'un rythme (Jones, 2009). La tâche de génération a indiqué que les séquences métriques et non métriques des expériences 2a et 2b ont été apprises de manière implicite. Sur la base des réponses à une tâche de reconnaissance, le SIMM a indiqué que l'apprentissage de la séquence métrique était implicite dans l'expérience 2a, mais pas dans l'expérience 2b. Le SIMM suppose que la fluidité perceptive reflète l'IL. La différence de résultats entre ceux obtenus avec la tâche de génération et ceux obtenus avec le SIMM dans l'expérience 2b suggère que la fluidité perceptive pourrait ne pas refléter un

apprentissage implicite mais plutôt un autre mécanisme cognitif tel que le contrôle sur les connaissances acquises de manière implicite (Shanks & Johnstone, 1999).

Les expériences 3a et 3b ont montré un AI de rythmiques métriques et non métriques avec une tâche de rappel sériel (Karabanov & Ullén, 2008; Ullén & Bengtsson, 2003). Dans l'expérience 3a, comprenant une séquence ordinale concomitante à la séquence rythmique, nous avons observé que les séquences métriques ont été plus facilement apprises que les séquences non métriques. De plus, la diminution du nombre d'erreurs ordinales était plus marquée en condition métrique qu'en condition non métrique. Ces résultats sont conformes à l'hypothèse d'oscillateurs attentionnels de la DAT (Jones & Boltz, 1989). Ainsi, en condition métrique, l'attention aurait été guidée vers des événements survenus à intervalles réguliers, ce qui aurait facilité l'encodage (et peut-être aussi la récupération mnésique) des séquences temporels et ordinaux. Les résultats obtenus avec les blocs de test rythmiques suggèrent un apprentissage d'une structure rythmique hiérarchisée (la métrique) dans la condition métrique.

Dans l'expérience 3b, où il n'y avait pas de séquence ordinale simultanée, les taux d'apprentissage étaient équivalents entre les séquences métriques et non métriques. Ce résultat suggère que la facilitation de l'apprentissage *du mètre* par la présence simultanée d'une séquence ordinale pourrait être plus faible quand l'organisation de la séquence ordinale est incertaine (incertitude probabiliste). Cependant, de même qu'avec les paradigmes à RU-TRS des expériences 2a et 2b, les blocs de test ont suggéré un liage métrique en condition métrique, mais pas en condition non métrique.

Globalement, les résultats suggèrent une facilitation d'apprentissage due à la métrique. L'hypothèse que les séquences métriques seraient apprises plus facilement que les rythmes non métriques a été confirmée par l'expérience 3a, qui a montré un taux d'apprentissage des séquences rythmiques et ordinales plus élevé en présence d'une séquence métrique qu'en son absence. Dans les expériences 2a (paradigme à RU-TRS), 2b, 3a et 3b, la facilitation de l'apprentissage due à la présence d'une séquence métrique a été observée avec les blocs de test dans lesquels le degré de métricité a été manipulé (blocs de test SM et WM). Ces résultats sont aussi en accord avec la DAT (Jones & Boltz, 1989) et la MBH (Jones, 2009).

Les cinq expériences et l'analyse basée sur une modélisation ont des implications plus générales, concernant notamment la perception temporelle, la cognition musicale et l'AI. En exploitant l'AI de séquences métriques, la présente thèse a mis en lumière le développement d'attentes temporelles lors de la perception de rythmes et la manière dont ces rythmes pourraient être cognitivement organisés dans des « groupes » ou des unités, telles que la

métrique. En utilisant des méthodes destinées à étudier l'AI, l'acquisition des attentes temporelles s'est produit d'une manière similaire à l'acquisition des connaissances par simple exposition, , c'est-à-dire sans intention d'apprendre et de façon implicite.

Enfin, la comparaison des résultats utilisant une tâche de génération, associé à la procédure de dissociation des processus, et des résultats utilisant le SIMM suggère une possible dissociation entre AI et fluidité perceptive. Au lieu de refléter l'AI, la fluidité perceptive pourrait être le reflet d'un mécanisme de contrôle implicite d'un apprentissage. Cette conclusion a donc des implications pour la recherche sur l'AI lorsqu'elle utilise la fluidité perceptive comme mesure de l'AI et pour notre compréhension, toujours controversée, de la relation entre la fluidité perceptive et l'AI (Shanks & Johnstone, 1999).

Références

- Brandon, M., Tillmann, B., Stevens, C.J., & Terry, J. *Implicit learning of temporal structures conforming to a metrical framework. Manuscript submitted* (copy on file with author).
- Buchner, A., & Steffens, M. C. (2001). Simultaneous learning of different regularities in sequence learning tasks: Limits and characteristics. *Psychological Research, 65*, 71-80.
- Cohen, A., Ivry, R. I., & Keele, S. W. (1990). Attention and structure in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition, 16*, 17-30.
- Essens, E. J. & Povel, D. J. (1985). Metrical and nonmetrical representations of temporal patterns. *Perception and Psychophysics, 37*, 1-7.
- Grahn, J. A. & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*, 893-906.
- Jacoby, L. L. (1991). A process dissociation framework: Separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of Memory and Language, 30*, 513-541.
- Jones, M. R. (2009). Musical time. In S. Hallam, I. Cross, & M. Thaut (Eds.), *The Handbook of Music Psychology*, (pp. 81-92). Oxford; New York : Oxford University Press.
- Jones, M. R. & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review, 96*, 459-491.
- Karabanov, A. & Ullén, F. (2008). Implicit and explicit learning of temporal sequences studied with the process dissociation procedure. *Journal of Neurophysiology, 100*, 733-739.
- Lerdahl, F., & Jackendoff, R. (1981). On the theory of grouping and meter *The Musical Quarterly, 67*, 479-506.
- London, J. (2004). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter*. New York: Oxford University Press.
- Miyawaki, K. (2006). The influence of the response-stimulus interval on implicit and explicit learning of stimulus sequence. *Psychological Research, 70*, 262-272.
- O'Reilly, J. X., McCarthy, K. J., Capizzi, M., & Nobre, A. C. (2008). Acquisition of the temporal and ordinal structure of movement sequences in incidental learning. *Journal of Neurophysiology, 99*, 2731-2735.
- Patel, A.D. (2008). *Music, language, and the brain*. New York: Oxford University Press.

- Patel, A.D., Iversen, J.R., Bregman, M.R., and Schulz, I. (2009). Experimental evidence for synchronization to a musical beat in a nonhuman animal. *Current Biology*, *19*, 827-830.
- 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*, 226-238.
- Povel, D.-J., & Essens, P. (1985). Perception of temporal patterns. *Music Perception*, *2*, 411-440.
- Salidis, J. (2001). Nonconscious temporal cognition: Learning rhythms implicitly. *Memory and Cognition*, *29*, 1111-1119.
- Shanks, D.R. (2005). *Implicit learning*. In: K. Lamberts & R. Goldstone (Eds.), *Handbook of Cognition* (pp. 202-220), Sage, London.
- Shanks, D. R. & Johnstone, T. (1999). Evaluating the relationship between explicit and implicit knowledge in a sequential reaction time task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, *26*, 1435-1451.
- Shanks, D. R. & St. John, M. E. (1994). Characteristics of dissociable human learning systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *17*, 367-447.
- Shin, J. C. (2008). The procedural learning of action order is independent of temporal learning. *Psychological Research*, *72*, 376-386.
- Shin, J. C., & Ivry, R. B. (2002). Concurrent learning of temporal and spatial sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory & Cognition*, *28*, 445-457.
- Ullén, F., & Bengtsson, S. (2003). Independent processing of the temporal and ordinal structure of movement sequences. *Journal of Neurophysiology*, *90*, 3725-3735.