

Université de Montréal

**La saturation de la mémoire auditive à court terme, une  
étude en électrophysiologie**

par

Kristelle Alunni-Menichini

Département de physiologie

Faculté de Médecine

Mémoire présenté à la Faculté de Médecine  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès sciences (M. Sc.)  
en Sciences neurologiques

Octobre, 2013

© Kristelle Alunni-Menichini, 2013

## Résumé

La présente étude vise à approfondir les connaissances relatives aux mécanismes neuronaux qui sous-tendent la maintenance de sons variant en hauteur dans la mémoire auditive à court terme (MACT), plus précisément lors de sa saturation. À cet effet, la technique des potentiels reliés aux événements (PRE) en électrophysiologie a été utilisée. La sélection des participants s'est déroulée par l'entremise de deux expériences comportementales : l'une était une tâche de discrimination et l'autre, une tâche qui évaluait l'habileté générale des participants à réussir une tâche similaire à celle de l'expérience principale en électroencéphalographie (EEG). Les résultats comportementaux de notre tâche en EEG ont montré que la performance diminuait de façon significative plus la charge en mémoire augmentait (séquences de 2, 4, 6 et 8 sons) et que l'estimation de la capacité de la MACT mesurée par K augmentait entre 2 et 4 sons pour atteindre un plafond à 4 sons (effet plafond). Le K maximum étant de 2.84 sons, l'empan mnésique (EM) auditif semble être près de 3 sons. Les résultats électrophysiologiques ont montré que la composante électrophysiologique reliée à la maintenance de sons en MACT, la *Sustained Anterior Negativity* (SAN), était modulée par le nombre de sons à maintenir : son amplitude augmentait de 2 à 4 sons et ce, jusqu'à l'atteinte d'un plafond à 4 sons. Ces résultats suggèrent que la maintenance de sons additionnels dans la MACT n'est plus possible après sa saturation. Nous soutenons donc que la SAN est un index électrophysiologique de l'activité neuronale associée à la maintenance d'items auditifs dans la MACT et que son amplitude est un bon indicateur de la capacité individuelle de la MACT, estimée par K. Des résultats post-hoc ont démontré que les musiciens et les non-musiciens tendent à avoir des différences au niveau de la SAN, sans pour autant modifier l'effet de charge en mémoire. Une analyse qualitative et quantitative de l'utilisation des stratégies mnésiques ont permis de clarifier leur implication et leur nature au sein d'une tâche cognitive de mémoire, plus précisément en audition. Pour conclure, l'ensemble de ces résultats suggère également que la SAN est reliée à la maintenance de sons dans la MACT et ainsi, un bon indicateur de sa capacité.

**Mots-clés** : Mémoire auditive à court terme (MACT); Électrophysiologie (EEG); Potentiels reliés aux événements (PRE); Empan mnésique (EM) auditif; Stratégies mnésiques.

## **Abstract**

The aim of the current study is to further understand, through the use of event-related potentials (ERPs), the neural mechanisms that underlie the maintenance of pitch in auditory short-term memory (ASTM) after reaching the memory span. Two behavioral experiments were used to help perform the selection of the participants: the first one was an evaluation of the acoustic discrimination and the second one was a general evaluation of participants' ability to succeed to a similar task of the one that will be used in the electrophysiological (EEG) part of the experiment. Behavioral results from the EEG task showed a significant decrease in accuracy when the load increased (sequences of 2, 4, 6 and 8 tones). The estimation of the memory capacity (named K), increased from load 2 to 4 and reached a plateau after 4 tones. The maximum K represented 2.84 tones; the auditory span seems to be around 3 tones. Experimental results showed that the ERP component related to the maintenance of tones in ASTM, as measured by the Sustained Anterior Negativity (SAN), was modulated by the load. More specifically, its amplitude increased when the load increased (from 2 to 4) and reached a plateau at load 4. These results suggest that the maintenance of additional tones in ASTM is not possible after its saturation. Thus, the SAN appears to be an adequate electrophysiological index of neuronal activity related to the maintenance of tones in ASTM, and its amplitude appears to be predicted by K. Post-hoc results showed that musician and non-musicians tend to have some differences in their electrophysiological results; however, no change related to the load effect was observed. Finally, a qualitative and quantitative analysis was done to investigate the impact of the use of different mnemonic strategies in ASTM. Taking together, our results support that the SAN component is related to the maintenance of tones in ASTM and can be considered as a good indicator of its capacity.

**Keywords:** Auditory short-term memory (ASTM), Electrophysiology (e.g. EEG), Event-related potentials (ERPs), Auditory span, Mnemonic strategies.

## Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Liste des tableaux.....	iv
Liste des figures.....	v
Liste des abréviations.....	vii
Remerciements.....	ix
Avant-propos.....	x
Introduction.....	12
L'empan mnésique (EM).....	13
Les stratégies mnésiques.....	16
La mémoire visuelle à court terme (MVCT).....	18
La mémoire auditive à court terme (MACT).....	20
Article ( <i>Under review</i> dans <i>Brain research</i> ).....	24
Méthodes supplémentaires.....	52
Résultats supplémentaires.....	53
Comparaison des musiciens et des non-musiciens.....	53
Section 1. Résultats comportementaux.....	53
Section 2. Résultats électrophysiologiques.....	55
Discussion.....	59
Bibliographie.....	71
Leek, M. R., 2001. Adaptive procedures in psychophysical research. <i>Perception &amp; Psychophysics</i> , 63(8), 1279-1292.....	75
ANNEXE 1.....	i
ANNEXE 2.....	iii

## Liste des tableaux

*Tableau 1.* Analyse qualitative et quantitative de la perception des participants quant à leur utilisation des stratégies mnésiques lors d'une tâche cognitive auditive.

*Tableau 2.* Effet de la position des sons dans une séquence sur la performance des participants.

## Liste des figures

*Figure 1.* Reproduction du modèle de la mémoire selon Atkinson & Shiffrin (1971).

*Figure 2.* Reproduction des figures obtenues par Vogel & Machizawa (2004) : Grande moyenne des signaux PRE au niveau des électrodes postérieures correspondant au nombre d'items visuels présentés (1, 2, 3, 4, 6, 8 et 10 items).

*Figure 3.* A) Moyenne de la capacité de la MVCT estimée par K; Grande moyenne des signaux ERP de la SPCN correspondant au nombre d'items visuels présentés (B) en EEG et (C) en MEG (Robitaille et al., 2001; Autorisée par les auteurs).

*Figure 4.* Topographie de l'activité cérébrale reliée à la SAN suite à une tâche de mémoire et une tâche contrôle (Guimond et al., 2011; Autorisée par les auteurs).

*Figure 1.* Estimation of mean capacity by K for each load (2, 4, 6, and 8 tones) in the EEG experimental task.

*Figure 2.* Scalp distribution of neuronal activity during the retention interval related to a memory task. A) Difference between Load 4 and Load 2. B) Difference between Load 6 and Load 4. C) Difference between Load 8 and Load 6.

*Figure 3.* Grand average of waveforms for electrodes located in the fronto-central region (AF3, F3, FC3, AFz, Fz, FCz, AF4, F4, FC4) for each load (2, 4, 6, and 8 tones) in the EEG experimental task.

*Figure 4.* Voltage difference of neuronal activity ( $\mu\text{V}$ ) between the load at which the maximum K value is reached (4, 6, or 8 tones) and Load 2 related to the maximum K value for each participant.

*Figure 5.* Example of one PEST test result. Number of tones presented in each level separated by arrows pointing to one level up or down. The span was computed as the mean of number of tones of all minimum thresholds.

*Figure 6.* Example of a 'different' trial with the same melodic contour. Presentation of sequences (2, 4, 6, and 8 tones) equalized to 9 auditory stimulations with white noises. Shown here are all 'different' trials to illustrate how we changed the tone that changed on such trials. The second sequence was the same as the first on 'same' trials.

*Figure 5.* La capacité de l'ASTM estimée par K des musiciens et des non-musiciens pour chacune des charges en mémoire (nombre de sons présentés : 2, 4, 6 ou 8 sons).

*Figure 6.* Grand moyenne des signaux PRE au niveau des électrodes fronto-centrales (AF3, AFz, AF4, F3, Fz, F4, FC3, FCz er FC4) des musiciens et des non-musiciens pour chacune des charges en mémoire (2, 4, 6 et 8 sons).

## Liste des abréviations

EEG : électroencéphalographie

EM : empan mnésique

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

MACT : mémoire auditive à court terme

MCT : mémoire à court terme

MEG : magnétoencéphalographie

ms : milliseconde

MVCT : mémoire visuelle à court terme

PRE : potentiels reliés aux évènements

$\mu$ V: microvolt

---

ASTM: acoustic short-term memory

CDA: contralateral delay activity

CNSW: contralateral negative slow wave

CNV: contingent negativity variation

dB: decibel

EEG: electroencephalography

ERP: event-related potentials

fMRI: functional magnetic resonance imaging

HEOG: horizontal electrooculogram

Hz: Hertz

MEG: magnetoencephalography

PEST: parameter estimation by sequential testing

PET: position emission tomography

SAN: sustained anterior negativity

SEM: standard error of the mean

SPCN: sustained posterior contralateral negativity

STM: short-term memory

VEOG: vertical electrooculogram

VSTM: visual short-term memory

*Ce présent travail pourra, je l'espère,  
approfondir les connaissances relatives à la  
mémoire auditive à court terme.*

## Remerciements

J'aimerais, tout d'abord, remercier mon directeur de recherche Dr. Jolicoeur ainsi que le directeur du programme Sciences Neurologiques Dr. Robitaille de m'avoir donné la chance inespérée d'être une étudiante aux études supérieures au sein d'un laboratoire. Tout cela a permis de m'épanouir et de prouver à autrui, mais surtout à moi-même, que j'avais les capacités de réussir une telle démarche.

Je voudrais également remercier mes amies et ma famille qui m'ont offert une épaule sur laquelle je pouvais compter à tout moment que ce soit sur le plan personnel ou professionnel. Un merci tout particulier à Synthia Guimond pour m'avoir supervisée au sein du laboratoire, pour m'avoir permis de réussir une démarche telle que celle-ci et pour avoir été présente à mes côtés tant dans les bons moments que dans les plus difficiles.

Merci à tous mes collègues, qui pour la plupart sont devenus de bons amis, tant dans mes petits moments de folie que par leur soutien tout au long de ces deux années. Je nomme plus particulièrement Sandrine Mendizabal, Isabelle Corriveau, Sébrina Aubin, Brandi Lee Drisdelle, Guillaume Collard, Sophie Nolden et Shannon O'Malley. Un merci à tous les assistants techniques qui m'ont aidée dans ma collecte de données afin que je puisse avoir de bons résultats à analyser, ainsi que Pia Amping pour la programmation de mes expériences.

Je tiens également à remercier mes co-auteurs pour leur aide précieuse quant à l'écriture de mon article, soit Synthia Guimond, Patrick Bermudez, Sophie Nolden, Christine Lefebvre et mon directeur de recherche Dr. Jolicoeur.

## Avant-propos

Notre laboratoire a entrepris une multitude d'études s'intéressant aux mécanismes neuronaux qui sous-tendent la mémoire auditive à court terme (MACT), puisqu'ils demeurent moins étudiés que ceux de la mémoire visuelle à court terme (MVCT). En effet depuis quelques années, son mandat était d'une part, isoler une composante électrophysiologique en électroencéphalographie (EEG) qui serait un bon index électrophysiologique de la MACT, tel que la *Sustained Posterior Contralateral Negativity* (SPCN) en vision ainsi que d'en étudier les différents paramètres, et d'autre part, d'identifier plus précisément ses localisations à l'aide de différentes techniques d'imagerie, telle que la magnétoencéphalographie (MEG) et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Tout d'abord, Grimault et al. (2009) ont étudié les corrélats neuronaux de la MACT par l'entremise de la MEG et l'IRMf afin de localiser les régions cérébrales activées par la maintenance de sons variant en hauteur tonal. Leurs résultats ont révélé que le cortex auditif secondaire, le cortex pariétal supérieur et le cortex frontal étaient activés lors de la maintenance de sons dans la MACT. Par la suite, Guimond et al. (2011) ont isolée une composante électrophysiologique, la *Sustained Anterior Negativity* (SAN), qui était modulée par le nombre de sons variant en hauteur maintenus dans la MACT : son amplitude augmentait lorsque la charge en mémoire augmentait (1 et 2 sons). Pour s'assurer que la composante n'était pas reliée à la durée des stimuli, les sons étaient présentés simultanément. Dans le même ordre d'idées, Nolden et al. (2013) ont localisé, en MEG, les régions cérébrales reliées à la maintenance de sons variant en hauteur lorsqu'ils étaient présentés simultanément (1 et 2 sons). Leurs analyses ont révélé que le gyrus temporal supérieur des deux hémisphères était impliqué dans la MACT, mais que dans l'hémisphère droit, le gyrus temporal inférieur, le gyrus frontal inférieur et le cortex pariétal jouaient

également un rôle dans ce processus. Lefebvre et al. (2013) ont quant à eux développé un paradigme en EEG pour isoler la SAN en vision (cercles de couleur) si elle était présente et en audition (sons variant en hauteur), tout deux présentés séquentiellement. Ce paradigme a permis d'une part, s'assurer que la SAN était bien un reflet de la maintenance en MACT et d'autre part, mesurer pour la première fois la SAN avec des séquences de sons.

La présente étude s'inscrit donc dans une trajectoire bien définie d'études portant sur la MACT au sein de notre laboratoire. Sous la supervision de ma collègue Synthia Guimond et de mon directeur de recherche, nous avons élaboré un paradigme nous permettant de mesurer la SAN lors du dépassement de l'empan mnésique (EM) auditif des participants. Avec l'appui des études préalablement citées, nous avons eu l'occasion de développer une expérience plus adaptée à notre paradigme et d'élaborer des hypothèses réalistes. Nous avons donc modifié le paradigme utilisé par Lefebvre et al. (2013) afin de : s'assurer que les participants dépassaient leur l'EM auditif en augmentant la charge en mémoire; et diminuer les changements du contour mélodique lorsque les séquences étaient différentes pour inciter les participants à maintenir les sons individuellement. Une fois l'expérience créée, j'ai été responsable de la quasi-totalité de la cueillette des données comportementales et électrophysiologiques, et j'ai réalisé la totalité des analyses s'y rapportant. La formation/supervision de Synthia Guimond et du Dr. Jolicoeur à chacune des étapes de mon processus m'ont été d'une aide précieuse. Finalement, j'ai rédigé l'article présenté ci-dessous en collaboration avec mes co-auteurs, qui ont su l'enrichir grâce à leurs expertises.

Prenez note que la numérotation des figures est suspendue lorsque l'article est présenté (numérotation originale) et reprise dès lors qu'il est terminé. Pour être conforme aux standards de la revue scientifique où il y a eu soumission, la méthode est présentée à la fin de l'article.

## Introduction

Aujourd'hui, vous avez fort probablement utilisé une faculté indispensable de votre cerveau : la mémoire. En effet, elle régit la plupart de vos activités quotidiennes, allant de raconter une blague entendue plus tôt sans se tromper à tout bout de champ à des activités beaucoup plus intellectuelles, telles que les sodokus. La mémoire étant d'une grande importance et encore peu connue due à sa complexité, l'un des objectifs majeurs des neurosciences est donc la compréhension des corrélats neuronaux qui la sous-tendent.

Atkinson & Shiffrin (1968, 1971) ont innové la conception de la mémoire, en la divisant en trois composantes : le registre sensoriel qui permet aux informations sensorielles entrantes d'être perçues et cela, indépendamment de sa modalité (p. ex. visuelle, auditive, tactile); la mémoire à court terme (MCT) qui permet la maintenance temporaire, de l'ordre des millisecondes à la minute, d'un nombre limité de ces informations; et la mémoire à long terme qui permet de maintenir des informations jugées pertinentes de façon durable (*Voir Figure 1*). Une nouvelle information sensorielle présente dans l'environnement aura donc à franchir plusieurs étapes, afin d'être maintenue à plus ou moins long terme dans le système nerveux central.

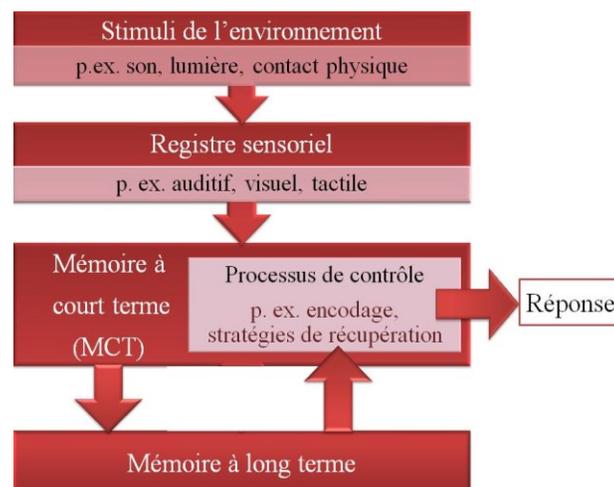


Figure 1. Reproduction du modèle de la mémoire selon Atkinson & Shiffrin (1971).

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à la MCT. C'est ce type de mémoire qui, lors d'une soirée entre amis, nous permet de retenir le visage d'une personne nouvellement rencontrée par l'entremise de la mémoire visuelle à court terme (MVCT), ainsi que son nom par l'entremise de la mémoire auditive à court terme (MACT). Le processus de mémorisation de la MCT peut se diviser en trois étapes : l'encodage qui permet l'apprentissage des informations qui ont su capter notre attention, la rétention qui permet sa maintenance temporaire et la récupération qui est caractérisée par son rappel (Cowan, 2000, 2008). Lorsque l'information est sujette à plusieurs distractions ou si elle est cataloguée comme n'étant pas pertinente, il est fort probable qu'elle sera oubliée. L'oubli peut donc être un atout important dans les processus mnésiques, car il permet d'enlever les informations jugées inutiles à maintenir.

En vue de bien introduire l'article présenté ci-dessous, nous décrivons les principales conclusions d'études portant respectivement sur l'empan mnésique (EM), les stratégies mnésiques, la MVCT et la MACT, ainsi que l'implication de ceux-ci dans notre étude qui vise la compréhension des corrélats neuronaux qui sous-tendent la MACT, après sa saturation.

### **L'empan mnésique (EM)**

Comme décrit plus haut, la MCT est une faculté limitée tant dans sa durée que dans le nombre d'informations qu'elle peut maintenir. Cette capacité limitée joue un rôle important dans l'aptitude à performer dans des tâches cognitives de haut niveau, telles que l'apprentissage, la compréhension et le calcul mental (Gathercole, 1999; Engle, 2002; Engle & Kane, 2003; Vogel & Machizawa, 2004; Conway et al., 2005; Li, Cowan & Saults, 2013).

Depuis des années, plusieurs chercheurs se sont donc intéressés aux limitations de la MCT ainsi qu'aux processus qui y sont reliés, notamment en mesurant l'EM. L'EM est le nombre d'items maximum qui peut être maintenu dans une courte période de temps. Plusieurs divergences ont émergé dans les articles portant sur ces limitations, notamment au niveau des stimuli utilisés, dans l'administration du test d'EM (p. ex. durée des stimuli et de la période de rétention) et de son calcul (Cavanagh, 1972; Conway et al., 2005). Selon une recension des écrits de Cavanagh (1972), les EM pouvaient varier de 2.2 à 8.2 items selon les stimuli utilisés, ici, des syllabes non-sens et des chiffres. D'un autre côté, Miller (1956), une des sommités dans le domaine, a jaugé l'EM à  $7 \text{ items} \pm 2$ , avec un EM auditif étant près de la limite inférieure due aux nombreuses confusions des participants pour des séquences de 5 sons ou plus (Pollack, 1953).

Après cette hétérogénéité entre les auteurs, il était nécessaire de réviser le calcul de l'EM et d'universaliser un peu le tout. Cowan, avec son célèbre papier *The magical number 4 in short-term memory* en 2000, a donc reconsidéré l'EM et a établi que celui-ci était de 3 à 4 items peu importe la modalité. Une des explications de Cowan (2000) pour la surestimation précédente de l'EM est que les participants ont la possibilité de dépasser les limitations de leur MCT, par exemple, en utilisant des stratégies mnésiques (p. ex. en encodant un groupe d'éléments par des associations).

Quelques études se sont intéressées spécifiquement à l'évaluation de l'EM auditif à partir de sons non-verbaux (sans code phonologique) variant au niveau d'une seule caractéristique acoustique (p. ex. sons variant en hauteur tonale). Ces études ont montré que l'EM auditif était plus petit que l'EM visuel avec une capacité de la MACT (K; Voir mesure

de l'EM ci-dessous) estimée à un peu moins de 3 sons (Prosser, 1995, Lehnert & Zimmer, 2006, Chen & Cowan, 2009; Morey et al., 2011; Li, Cowan & Saults, 2013).

Après ces constats, une question qui subsiste est : comment peut-on mesurer l'EM? Plusieurs méthodes existent, dont deux seront décrites ci-dessous.

La première méthode qui est décrite s'appuie sur l'observation d'une baisse abrupte de la performance, accompagnée d'un ralentissement du temps de réponse, lors du dépassement de l'EM. Lorsque le nombre d'items à maintenir est inférieur à l'EM, la tâche de reconnaissance et/ou de rappel devrait être considérée facile par le participant. En théorie, la performance attendue avant l'atteinte de l'empan serait de l'ordre du 100% et ses alentours. Dans ce cas, une baisse abrupte de la performance après son dépassement serait un excellent indicateur de la capacité de la MCT. Par contre, les performances étant rarement parfaites et ce même avant l'atteinte de l'EM, la baisse de la performance est donc moins abrupte qu'en théorie. D'un autre côté, Vogel, Woodman & Luck (2001) ont soutenu que cette méthode pouvait également sous-estimer la capacité réelle de la MCT, car le nombre d'items que les participants maintiennent au fil des essais peut varier d'un essai à l'autre. La fatigue, par exemple, peut contribuer à une diminuer la propension à bien performer à la tâche et ainsi, diminuer la moyenne de la performance pour la totalité de l'expérience.

La seconde méthode décrite, basée sur la formule de Pashler (1988) et développée par Cowan (2000), est la formule de K. Cette formule est la première méthode quantitative pour calculer, de façon plus précise, la capacité de la MCT. Elle est décrite comme suit :  $K = [S \times (H - F)]$ , où le « K » est le nombre estimé d'items maintenus en MCT, le « S » est le nombre

d'items présentés, le « H » est le taux de détections correctes<sup>1</sup> et le « F » est le taux de fausses alarmes<sup>2</sup>. Actuellement, cette méthode qui permet l'inclusion des bonnes détections et des fausses alarmes, est considérée comme l'une des plus utilisées pour calculer l'EM de la MCT.

## **Les stratégies mnésiques**

Cowan (2000) a précisé à maintes reprises qu'une surestimation de l'EM de la MCT était possible suite à l'utilisation de stratégies mnésiques par les participants, afin de déjouer les limitations de la MCT. Les stratégies mnésiques faciliteraient donc la mémorisation d'items dans la MCT, telles que la répétition, la formation de groupe d'éléments par association (*chunks*) et la saillance d'un item (Atkinson & Shiffrin, 1968, 1971; Baddeley, 1986; Brigham & Pressley, 1988; Cowan, 2000; Cameron et al., 2005; Fort, 2005; Guimond et al. 2011). Pour que ces stratégies aient l'effet escompté, le participant doit tout de même les utiliser adéquatement. Pour ce faire, il doit avoir les connaissances requises quant à ses conditions d'utilisation (comment doit-on l'utiliser?) et doit avoir confiance en ses propres compétences actuelles (je suis capable de l'utiliser; Schneider & Pressley, 1989). Plusieurs études ont voulu observer l'impact de la répétition et des associations sur des tâches cognitives en neuroimagerie. En électroencéphalographie (EEG), Guimond et al. (2011) ont observé une composante reliée à la maintenance de sons non-musicaux variant en hauteur tonale lors d'une suppression articulatoire; les participants ne pouvaient pas utiliser la répétition pour faciliter leur mémorisation. Ils ont remarqué que l'absence de répétition amenait un déplacement linéaire vers le haut (positif) de la composante, mais sans affecter la différence d'activation

---

<sup>1</sup> Le taux de détections correctes : Proportion des bonnes détections (une différence est détectée lorsque les séquences sont réellement différentes) sur le nombre total de séquences différentes

<sup>2</sup> Le taux de fausses alarmes : Proportion des fausses alarmes (une différence est détectée lorsque les séquences sont en fait identiques) sur le nombre de séquences identiques

entre les charges (*Voir* 1.4. La MACT). En imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), des études ont montré qu'un réseau préfronto-pariétal était impliqué dans le contrôle des stratégies mnésiques et ce, peu importe la stratégie utilisée (Petrides & Milner, 1982; Rypma et al., 1999; Bor et al., 2004; Bor & Owen, 2007; Champod & Petrides, 2007). Plus précisément, l'activation des régions de ce réseau a également été observé dans plusieurs études portant sur la MACT (Grimault, 2009; Foster & Zatorre, 2010; Schulze, Mueller & Koelsch; 2011; Nolden et al., 2013). Par contre, peu d'études se sont intéressées à la nature des stratégies utilisées selon la modalité, autre que la répétition et les associations, ainsi qu'aux circonstances de leur utilisation.

Maintenir la position de certains items dans leur contexte peut être une de ces stratégies mnésiques. Ainsi, l'effet de primauté peut être décrit comme une tendance à maintenir plus longtemps en MCT les premiers items (1 ou 2) qui sont présentés. Quant à l'effet de récence, il peut être défini comme une probabilité plus élevée de retrouver les derniers items présentés, en MCT (Beaman & Morton, 2000; Wiswede, Rüsseler & Münte, 2007). Plus précisément, McFarland & Cacace (1992) auraient démontré la présence d'un effet de primauté et de récence avec des sons purs non-verbaux.

Dans le cadre de ce mémoire, une analyse qualitative sur la perception des participants quant à leur utilisation des stratégies mnésiques et l'effet de la position des sons dans les séquences à maintenir seront présentés dans la section Résultats supplémentaires.

## La mémoire visuelle à court terme (MVCT)

Les limitations de la MCT ont été étudiées dans des études comportementales dont plusieurs ont été citées plus haut, mais également en EEG, en magnétoencéphalographie (MEG) et en IRMf au niveau de la MVCT.

Vogel & Machizawa (2004) ont montré en utilisant des potentiels liés aux évènements (PRE) que l'amplitude en voltage de l'activité neuronale était hautement modulée par le nombre d'items maintenus dans la MVCT. L'amplitude de l'activité neuronale controlatérale augmentait de façon négative à mesure de l'augmentation du nombre d'items maintenus dans la MVCT et ce, jusqu'à l'atteinte de l'EM visuel. Suite à son dépassement, un effet plafond débutait aux alentours de 3, 4 sons; l'EM visuel semblait donc être de 3 à 4 items. Ils ont donc conclu que la mesure individuelle de l'amplitude en voltage de l'activité neuronale était un bon indicateur de la capacité de la MVCT.

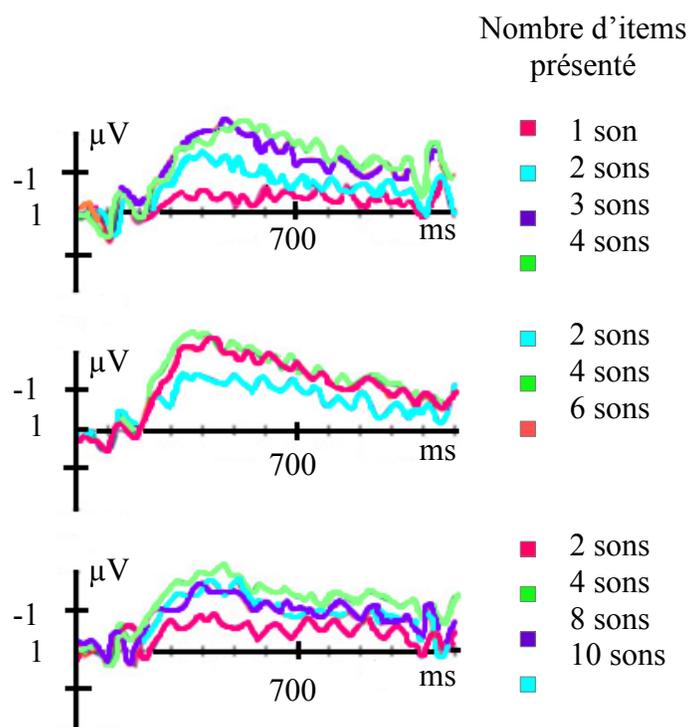
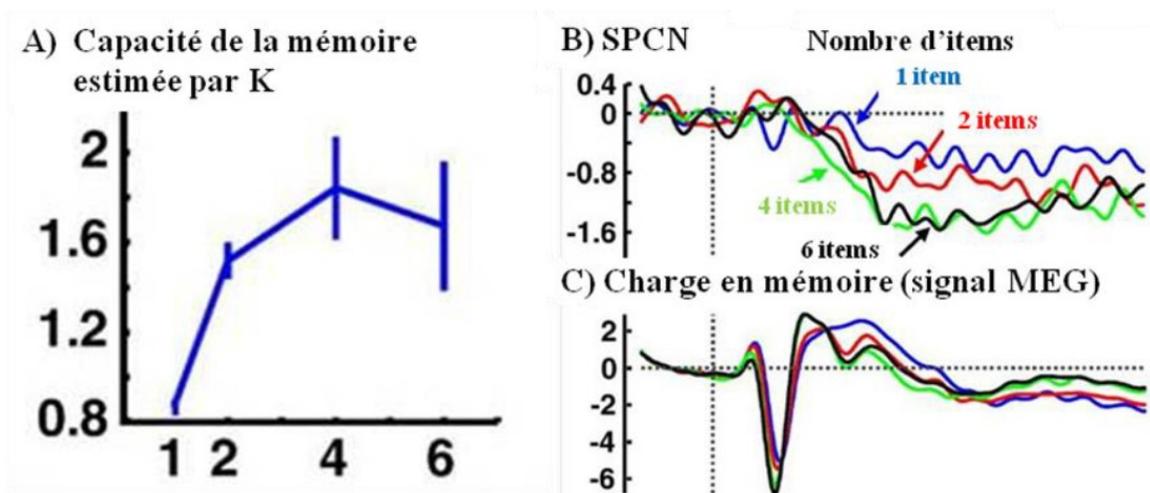


Figure 2. Reproduction des figures obtenues par Vogel & Machizawa (2004) : Grande moyenne des signaux PRE au niveau des électrodes postérieures correspondant au nombre d'items visuels présentés (1, 2, 3, 4, 6, 8 et 10 items).

Par la suite, Robitaille et al. (2010) ont utilisé un paradigme similaire à Vogel & Machizawa en se concentrant sur les modulations d'une composante électrophysiologique en particulier, la *sustained posterior controlateral negativity* (SPCN) qui est associée à la maintenance d'items visuels dans la MVCT. Tout comme ces derniers, ils ont observé que la SPCN était modulée par le nombre d'items à maintenir; son amplitude augmentait jusqu'à l'atteinte de l'EM visuel, suivi d'un effet plafond. Ils ont étendu leur étude en étudiant cet effet avec d'autres techniques d'imagerie, tels que la MEG et l'IRMf. Ils ont trouvé des résultats similaires en MEG, avec des générateurs localisés dans les lobes pariétaux supérieurs par l'IRMf. Voulant établir un lien avec les études comportementales portant sur les limitations de la MCT, ils ont également fait une corrélation entre les résultats en neuroimagerie et le K, comme mesure de la capacité de la MCT (Voir 1.1. L'empan mnésique). Ils ont conclu que l'amplitude en voltage de l'activité cérébrale était significativement prédite par le K; la mesure du K est alors considérée comme un bon indicateur de la capacité de la MVCT.



*Figure 3.* A) Moyenne de la capacité de la MVCT estimée par K; Grande moyenne des signaux ERP de la SPCN correspondant au nombre d'items visuels présentés (B) en EEG et (C) en MEG (Robitaille et al., 2001; Autorisée par les auteurs).

Après la revue de ces résultats qui convergent vers une modulation et une saturation de la MVCT par l'observation d'une composante reliée à la maintenance d'items visuels, pourquoi ne peut-on pas seulement les extrapoler pour la MACT?

Malgré que certains mécanismes semblent opérer de façon similaire entre les modalités (*Voir* 1.4. La MACT), plusieurs auteurs ont montré des indications que : 1) des processus mnésiques spécifiques aux modalités existent bel et bien (Penney, 1989; Lang et al., 1992; Berz, 1995; Hulme & Roodenrys, 1995; Schumacher, 1996; Ruchkin et al., 1997; Ruchkin, 1999; Lefebvre et al., 2013); 2) ces mêmes processus recrutent des régions cérébrales distinctes (Grimault et al., 2009 ; Robitaille et al., 2010, Nolden et al., 2013). Un intérêt demeure alors à étudier chacune des modalités individuellement, afin de mieux comprendre les similitudes et les différences des processus mnésiques qui leur sont propres. Malgré cela, la MVCT continue à être plus étudiée dans la littérature actuelle que la MCT des autres modalités (p. ex. auditive et tactile). Puisque la MACT est tout aussi importante que la MVCT dans notre vie, nous considérons qu'il est crucial de mieux comprendre les corrélats neuronaux qui la sous-tendent.

### **La mémoire auditive à court terme (MACT)**

Plusieurs études portant sur la MACT utilisaient principalement le matériel verbal pour leurs paradigmes et leurs tâches expérimentales. Parmi celles-ci, deux auteurs ont étudié les différences entre la MVCT et la MACT en EEG (Lang et al, 1992; Ruchkin et al., 1997). L'utilisation du matériel verbal dans ce paradigme a été judicieuse, puisque l'inférence des

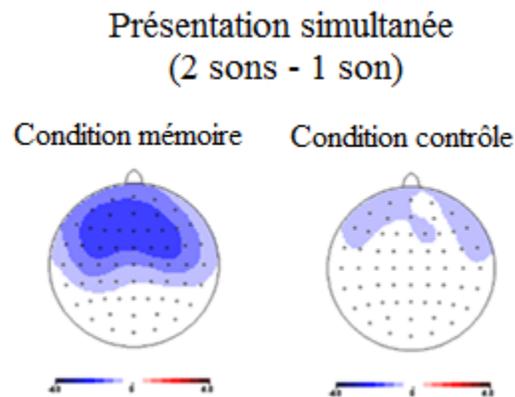
résultats était d'autant plus attributive aux différences entre les deux systèmes (visuel et auditif) et non aux différences dans l'administration ou dans les stimuli. Tous deux ont observé une négativité frontale, prépondérante dans l'hémisphère gauche, qui était modulée par le nombre d'items maintenus en mémoire. Cette négativité semblait donc être associée à la maintenance d'items verbaux, présentés en modalité auditive.

Tout comme les autres modalités, l'information verbale aurait des processus mnésiques et recruterait des régions cérébrales qui lui sont propres (Penney, 1989; Hulme & Roodenrys, 1995; Shumacher et al., 1996, Ruchkin et al., 1997). De plus, chaque information verbale peut être différente selon ces codes mnémoniques (p. ex. lexical, sémantique, phonologique, etc.) et selon la modalité dans laquelle elle est présentée (p. ex. visuelle ou auditive), ce qui influencerait les processus mnésiques qui en découlent et qui impliqueraient plusieurs sous-systèmes (Penney, 1989; Berz, 1995; Hulme & Roodenrys, 1995; Schumacher et al., 1996; Martin & Saffran, 1997; Ruchkin et al., 2003; Postle, 2006; D'Esposito, 2007; Ruchkin, 1999).

Une question qui est légitime de se poser à la lumière de ses allégations : est-ce que le meilleur paradigme pour étudier la MACT devrait utiliser des stimuli verbaux ou plutôt des stimuli auditifs plus simples? Il est certain que l'utilisation de stimuli unimodaux au système d'intérêt tendrait à réduire au minimum les contributions des autres systèmes.

Une approche de ce type visant justement à isoler les mécanismes neuronaux spécifiques à la MACT est l'élaboration d'un paradigme ayant pour stimuli des sons purs non-musicaux variant en hauteur tonal (Prosser, 1995; Grimault et al., 2009; Guimond et al. 2011; Lefebvre et al., 2013; Li, Cowan & Saults, 2013). Parmi ces études, Guimond et al. (2011) ont

découvert une composante électrophysiologique fronto-centrale, la *sustained anterior negativity* (SAN), qui était modulée par le nombre de sons (1 son vs. 2 sons); son amplitude en voltage augmentait de façon négative lorsque le nombre de sons maintenus augmentait. Cette étude a permis de faire un excellent parallèle avec une composante reliée à la maintenance d'items en MVCT, soit avec la SPCN. Une présentation simultanée des stimuli, possible grâce à sa faible charge en mémoire (1 son vs. 2 sons) a permis d'assurer que la SAN n'était pas modulée par un contour mélodique ou par une durée totale des stimuli différente pour chacune des charges.



*Figure 4.* Topographie de l'activité cérébrale liée à la SAN suite à une tâche de mémoire et une tâche contrôle (Guimond et al., 2011; Autorisée par les auteurs).

Maintenant cela établi, une extension des recherches sur la SAN, quant à sa modulation dépendante à la charge et à ses autres caractéristiques, a vu le jour. Lefebvre et al. (2013) a également retrouvé la SAN au cours de son paradigme visant à comparer des stimuli visuels à des stimuli auditifs, tous deux présentés séquentiellement. La SAN, ayant les mêmes caractéristiques que la précédente étude (topographie, période et dépendante à la charge en mémoire), n'a été observée que dans la modalité auditive. Cette étude, comparée aux études

citées plus haut sur la MCT verbale où des processus mnésiques communs étaient activés indépendamment de la modalité (visuelle et auditive), nous a assuré que l'utilisation de sons purs non-musicaux variant en hauteur tonale réduisait réellement l'implication de divers systèmes.

Au meilleur de nos connaissances, les processus neuronaux qui sous-tendent la saturation de la MACT n'ont jamais été investigués. L'article présenté dans le cadre de ce mémoire visait deux objectifs. Le premier objectif était d'investiguer les limitations de la MACT en mesurant la SAN, la composante électrophysiologique reliée à la maintenance d'items dans la MACT, lorsque l'EM auditif est excédé. Le second objectif était d'établir une corrélation entre la capacité de la MCT (K) et les résultats obtenus en EEG. Ayant des ressemblances tangibles entre la SPCN et la SAN, notre hypothèse quant à la modulation de la SAN après l'atteinte de l'EM auditif, était d'observer un effet plafond au moment de son dépassement.

Des résultats posthoc intéressants seront présentés dans la section résultats supplémentaires, ainsi qu'une brève discussion sur leur apport pour la littérature en matière de la MACT.

**Article (*Under review dans Brain research*)**

Saturation of auditory short-term memory causes a plateau in the  
sustained anterior negativity event-related potential.

Kristelle Alunni-Menichini, Synthia Guimond, Patrick Bermudez, Sophie Nolden, Christine  
Lefebvre, & Pierre Jolicoeur

<sup>1</sup>Université de Montréal, BRAMS, CERNEC, Québec, Canada

## **Abstract**

The maintenance of information in auditory short-term memory (ASTM) is accompanied by a sustained anterior negativity (SAN) in the event-related potential measured during the retention interval of simple auditory memory tasks. Previous work on ASTM showed that the amplitude of the SAN increased in negativity as the number of maintained items increases. The aim of the current study was to measure the SAN and observe its behavior beyond the point of saturation of auditory short-term memory. We used atonal pure tones in sequences of 2, 4, 6, or 8 tones. Our results showed that the amplitude of SAN increased in negativity from 2 to 4 items and then levelled off from 4 to 8 items. Behavioral results suggested that the average span in the task was slightly below 3, which was consistent with the observed plateau in the electrophysiological results. Furthermore, the amplitude of the SAN predicted individual differences in auditory memory capacity. The results support the hypothesis that the SAN is an electrophysiological index of brain activity specifically related to the maintenance of auditory information in ASTM.

## **Keywords**

Auditory short-term memory (ASTM); memory capacity; pitch; electroencephalography (EEG); event-related potentials (ERP); sustained anterior negativity (SAN).

## **1. Introduction**

One of the major goals of neuroscience is to understand the neuronal mechanisms underlying the processing of sensory events in the central nervous system. A limited number of representations of these sensory events from all modalities (e.g., brief visual, auditory, or tactile stimuli) are temporarily stored in short-term memory (STM). Such sensory memory systems have innumerable applications in daily cognition. For instance, we would be unable to understand any form of spoken language without auditory short term memory (ASTM), given that we need to retain each word as a phrase unfolds over time. Limitations of STM capacity are directly related to individual aptitude in high-level cognitive functions such as the maintenance of temporary representations that allows planning steps required to achieve or to modify a goal (Engle & Kane, 2003; Vogel & Machizawa, 2004). A better understanding of the capacity limits of STM is thus relevant to our understanding of many dependent aspects of cognition.

Our present goal was to determine if an electrophysiological index (the sustained anterior negativity (SAN); Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013), previously shown to be sensitive to the number of items held in ASTM, would level off (i.e., reach a plateau) as the behavioral maximal number of stored representations is reached. Such an observation would further confirm the SAN as a neural correlate of the maintenance of auditory information in ASTM.

In this study, we focus on STM that lasts a few seconds and is presumed to require sustained neural firing for its maintenance. This maintenance is also limited in the number of items it can hold, which is typically on the order of 4 (Luck & Vogel, 1997; Cowan, 2000). In the auditory domain, the span found in tasks using atonal tones was around 2 (Prosser, 1995;

Cowan, 2013). A common measure of STM span is the K value obtained with a formula:  $K = (S \times (H - F))$ , where K is the memory capacity, S is the number of items presented during the encoding, H is the hit rate<sup>3</sup>, and F is the false alarms rate<sup>4</sup> (Pashler, 1988; Cowan, 2000). The correct detection of difference is considered a hit whereas signaling a difference when the sequences are identical is considered a false alarm. Given the assumption that memory mechanisms work harder when more representations need to be maintained, it is equally reasonable to assume that an index reflecting this mnemonic activity should be modulated by the number of items to be maintained in STM. The increase in activity should occur to the point of saturation, beyond which additional items should not be held in STM.

Studies of visual short-term memory (VSTM) have verified memory saturation and its neural correlate with electroencephalography (EEG), magnetoencephalography (MEG), and functional magnetic resonance imaging (fMRI) (Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004; Vogel & Machizawa, 2004). Klaver and colleagues (1999) first reported a contralateral negative slow wave (CNSW), an event-related potential (ERP) component related to VSTM that was strongest at posterior electrodes over the hemisphere contralateral to the visual field in which visual shapes were presented. In another ERP study, Vogel and Machizawa (2004) focused on brain activity observed during the retention interval and referred to it as contralateral delay activity (CDA). The CDA amplitude increased in negativity as the number of items maintained in VSTM increased. Importantly, they showed that its amplitude reached a plateau corresponding to the group average span. They suggested that variation in CDA

---

<sup>3</sup> Hits rate: hits / (total number of trials where the sequences were different)

<sup>4</sup> False alarm rate: false alarms / (total number of trials where the sequences were identical)

across memory loads reflects the maintenance of different numbers of visual representations and, for this reason, was a good index of the span of VSTM.

The sustained posterior contralateral negativity (SPCN), a lateralized EEG component, was also observed during the maintenance of visual items in memory tasks (Jolicoeur et al., 2008). Likely to be the same component as the CNSW and CDA, its amplitude increased in negativity with the number of items to maintain, until where a plateau was formed corresponding to the memory span (Robitaille et al., 2010). The SPCN has been studied in a variety of cognitive tasks going beyond simple short-term memory tasks (e.g., the attentional blink, Dell'Acqua et al., 2006; Jolicoeur et al., 2008; Jolicoeur et al., 2006a 2006b; or mental rotation, Prime & Jolicoeur, 2010). Due to its involvement in tasks that are not memory tasks *per se*, and/or in tasks in which the stimulus remains visible throughout, it seems prematurely restricting to refer to this component as delay activity (e.g., Drew et al., 2009; Lefebvre et al., 2010). Therefore, we will use the SPCN nomenclature for the remainder of the paper. To date, it seems the SPCN for visual memory bears some similarity to the SAN for auditory memory.

Robitaille et al. (2010) extended the work in EEG with MEG recordings of neuronal activity during VSTM maintenance and found a similar pattern to that in EEG. Source localization analyses suggested generators in the superior parietal lobes, consistent with fMRI studies (e.g., Harrison et al., 2010; Robitaille et al., 2010; Todd & Marois, 2004). The authors also found that SPCN amplitude during the retention period was significantly predicted by the behavioral estimate of retention capacity,  $K$ , such that as  $K$  increased toward the group average span, SPCN amplitude levelled off. This correlation was the first demonstration using MEG linking individual differences in capacity to changes in neuronal activity in superior

parietal cortex during the retention of visual representations. These results dovetailed nicely with the earlier work of Vogel and Machizawa (2004) and Todd and Marois (2004).

Since several studies show the existence of modality-specific processing streams, we extend the approach used to study VSTM to the study ASTM. Although previous work has shown interesting relationships between ERPs and memory, none has found a clear plateau as a function of number of items or linked the results to individual differences in span (e.g., Lang et al., 1992; Ruchkin et al., 1992; Schumacher et al., 1996).

In early ASTM studies using verbal information, ERP differences were observed between aurally and visually presented stimuli during the presentation and retention periods (Lang et al., 1992; Ruchkin et al., 1997). Lang et al. (1992) observed a negativity that was more predominant at the frontal scalp electrodes for 3 digits presented aurally than for 3 digits presented visually. Ruchkin et al. (1997) also observed a frontal negativity present in both modalities, but they divided this negativity into a left-lateralized component that was common to both modalities and a bilateral component that was more pronounced in the auditory modality. It is not clear if the authors used “bilateral” in their description of a central distribution to suggest bilateral generators in the auditory cortices. Unlike Lang and colleagues (1992), the study of Ruchkin et al. (1997) manipulated the number of syllables presented in non-words and, therefore, memory load. Their results revealed that the amplitude of the frontal negativity varied with memory load.

As valuable as these collected results are, a major question remains: is the use of verbal information the best way to study ASTM? Several additional mnemonic codes support the retention of such information (e.g., semantic, phonological, orthographic, etc.). Schumacher and colleagues (1996) targeted STM with aurally and visually presented letters with a positron

emission tomography (PET) paradigm. The subtraction of control conditions from memory conditions showed similarities in brain regions recruited in the two sensory modalities (visual and auditory) and thus suggested that verbal STM may be multimodal. Furthermore, it is clear from the above described studies that verbal material presented aurally may rely on more than one memory subsystem.

Several prominent models of working memory conjecture that certain brain areas specialize in the perception and maintenance of specific stimuli. For example, the secondary auditory cortex may specialize in the maintenance and perception of simple auditory stimuli (e.g., Ruchkin et al., 2003; Postle, 2006; D'Esposito, 2007; Grimault et al., 2009, 2014; Nolden et al., 2013). In contrast, the maintenance of multimodal information (e.g., verbal information), or maintenance with a monitoring aspect (e.g., mnemonic strategy) may require the involvement of additional brain regions such as the prefrontal and the posterior parietal cortex (e.g., Rypma et al., 1999; Champod & Petrides, 2007, Grimault et al., 2009, 2014; Nolden et al., 2013).

An approach devised to minimize potential contributions from multiple memory systems in the study of ASTM (e.g., implicit or explicit knowledge of verbal information and musical experiment), is to use non-verbal acoustic information (Prosser, 1995; Jolicoeur et al., 2008; Grimault et al., 2009; Guimond et al., 2011; Li, Cowan & Saults, 2013; Lefebvre et al., 2013). With such a paradigm, Grimault et al. (2009, 2014) studied ASTM using fMRI and MEG and found bilateral load-dependent activations in the anterior portion of the hippocampus as well as the left secondary auditory area and the superior parietal cortex. Grimault et al. also found in these brain regions an increase of activation that was proportional to the number of items held in ASTM. In another study from the same group, Guimond et al.

(2011) observed an ERP component directly involved in the maintenance of tones varying in pitch in ASTM. In their 3 experiments, they used simultaneous presentations of tones at two levels of memory load: Load 1 presented the same tone simultaneously to both ears whereas Load 2 presented two different tones simultaneously, one to each ear. Varying load with simultaneous tones ensured that melodic contour was absent and that duration was equal between the load conditions. The authors found an ERP component present during the retention interval and that had all the features of a sustained anterior negativity (SAN, Jolicoeur et al., 2008). Importantly, the SAN was observed during a memory task but not during a control task during which retention was not required. Lefebvre et al. (2013) had as goal to demonstrate an electrophysiological correlate of maintenance of tones (the SAN) that is different from ERPs accompanying the maintenance of sequential presentations in VSTM. They compared the maintenance of pure tones varying in pitch to visually presented coloured disks, both with a sequential presentation. They concluded that the SAN was present only in maintenance of tones, and it was not related to the sequential presentation, *per se*. They did not focus on brain activity after exceeding span and hence did not find a plateau in the ERPs for a number of reasons. In addition, important sources of evidence suggesting that it is the number of tones and not the duration of the sequence that impacts the amplitude of the SAN come from the work of Guimond et al. (2011) and Lefebvre et al. (2013).

To the best of our knowledge, the saturation of ASTM (i.e., when the number of to-be-maintained tones exceeds the span), has never been investigated. As described above, the SPCN was a load-dependant component related to the maintenance of visual items. The saturation of VSTM has been studied with SPCN; this amplitude across memory loads has proved a good predictor of individual differences in VSTM span (Robitaille et al., 2010).

Following this result, an interesting question is: could an equivalent result be obtained in the auditory domain assuming that the SAN is the electrophysiological correlate of the maintenance of tones? Using EEG, we attempted to observe whether the mechanisms related to the maintenance of tones with a classic STM recognition task (e.g., encoding, retention and recognition; Cowan, 2000, 2008; Robitaille et al., 2010; Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013) is similar to those for visual items after reaching the span capacity. In behavioral studies, ASTM has a limited capacity in the number of items maintained (e.g., Prosser, 1995; Cowan, 2000; Robitaille et al., 2010; Li, Cowan & Saults, 2013). The aim of the current study was to investigate in electrophysiology the capacity limits of ASTM using atonal sequences of pure tones varying in pitch. To date, the activity of memory mechanisms that hold auditory and visual memories in an active state during retention (SPCN for visual; SAN for audition) has seemed similar. Our hypothesis was that the amplitude of the SAN should increase in negativity with memory load up to the point where the maximum span is reached. Beyond this point, further increases in the number of presented items should produce no further increase in the SAN, as has been found for the SPCN in VSTM (e.g., Vogel & Machizawa, 2004; Robitaille et al., 2010).

## 2. Results

### 2.1. Behavioral Data

A repeated-measures ANOVA revealed a main effect of load on response accuracy ( $F(3, 72) = 287.18, p < .001, MSE = 0.14, \eta_p^2 = 0.92$ ). The means of response accuracy decreased significantly as memory load increased: 96% for Load 2, 86% for Load 4, 72% for Load 6, and 63% for Load 8. The difference between musicians and non-musicians was not significant ( $F(2.3, 53) = 0.333, p > 0.700, MSE = 0.003, \eta_p^2 = 0.014$ )

Figure 1 presents mean K values, which are estimates of the number of tones maintained in each of the memory load conditions. A repeated-measures ANOVA revealed a main effect of load on mean of K values. Post-hoc tests revealed this effect to be due to a significant increase between Loads 2 and 4 ( $t(24) = -10.91, p < 0.001, MSE = 0.09, \eta_p^2 = 0.437$ ). The mean capacity, K, reached a maximum at Load 4, and decreased between each subsequent level until Load 8; although the decrease from Load 4 to 6 was not significant ( $p < .10$ ), the further drop from Load 6 to 8 was significant ( $p < .015$ ). These results were consistent with previous studies (Cowan, 2000, 2013; Robitaille et al., 2010). As for accuracy, the difference between musicians and non-musicians was not significant ( $F(2, 47.3) = 0.383, p > 0.650, MSE = 0.46, \eta_p^2 = 0.016$ ).

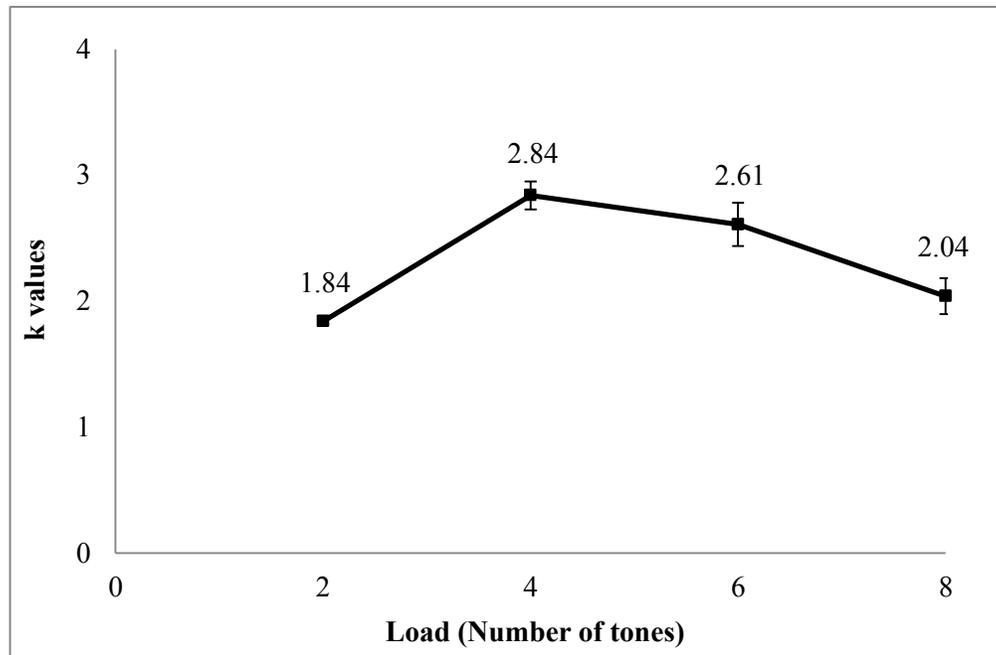
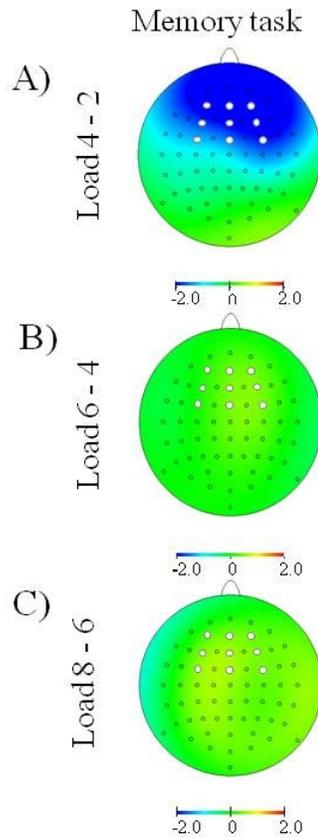


Figure 1. Estimation of mean capacity by K for each load (2, 4, 6, and 8 tones) in the EEG experimental task.

## 2.2. Electrophysiological Data

Figure 2 presents the scalp distributions of the mean voltage difference between memory loads from 900 to 1500 ms after the onset of the retention interval. The scalp topography of Load 4 minus Load 2 in Figure 2A shows that the activity at fronto-central regions became more negative in the higher load condition, typical of the SAN (Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013). The scalp topography of Load 6 minus Load 4 in Figure 2B and Load 8 minus Load 6 in Figure 2C shows a stabilization of activity when the span was exceeded.



*Figure 2.* Scalp distribution of neuronal activity during the retention interval related to a memory task. A) Difference between Load 4 and Load 2. B) Difference between Load 6 and Load 4. C) Difference between Load 8 and Load 6.

Figure 3 shows the grand-average pooling waveforms for electrodes of interest (more precisely the fronto-central electrodes: AF3, F3, FC3, AFz, Fz, FCz, AF4, F4, and FC4; see Figure 2), where we observed a load-dependant negative drift during the retention period. A 3 x 3 x 4 repeated measures ANOVA was performed on the mean voltage of these electrodes during the retention interval. The three within-subject factors were the laterality of the fronto-central electrodes positions (left, midline, and right), the anterior-posterior position of these electrodes (anterior, central, and posterior) and the memory load conditions (2, 4, 6, and 8 tones).

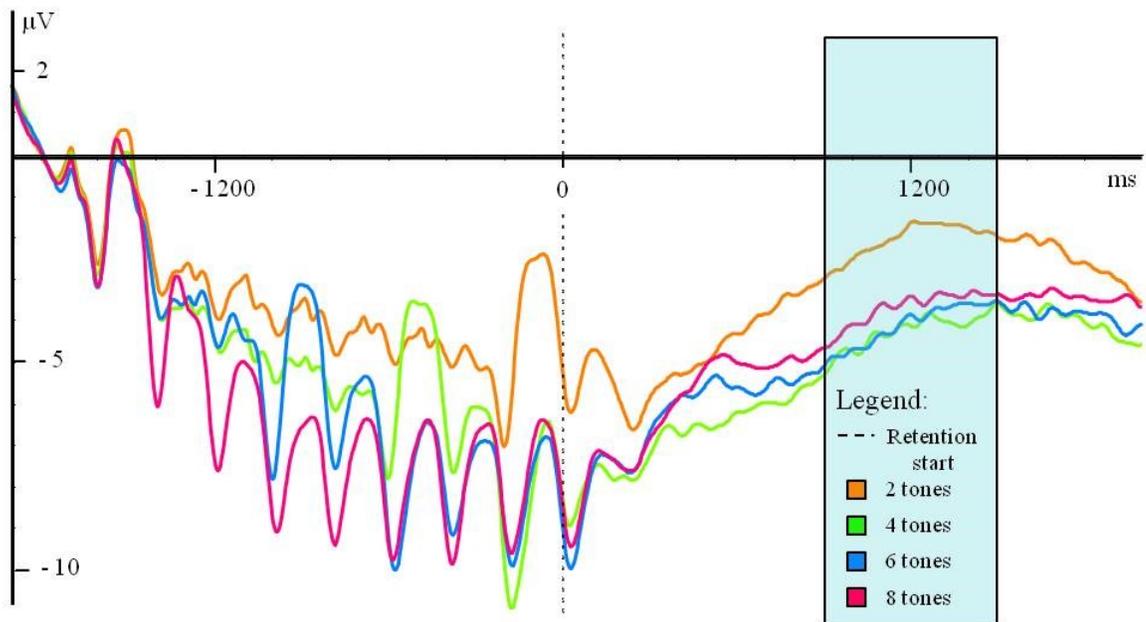


Figure 3. Grand average of waveforms for electrodes located in the fronto-central region (AF3, F3, FC3, AFz, Fz, FCz, AF4, F4, FC4) for each load (2, 4, 6, and 8 tones) in the EEG experimental task.

The ANOVA results showed a significant main effect of memory load during the retention phase 900 to 1500 ms after last tone offset ( $F(2.80, 67.30) = 18.88, p < .001, MSE = 974.14, \eta_p^2 = 0.44$ ). We found a significant increase in negativity between Load 2 and Load 4, 6, and 8 (4:  $t(24) = 7.98, p < 0.001, MSE = 0.30$ ; 6:  $t(24) = 5.62, p < 0.001, MSE = 0.36$ ; 8:  $t(24) = 4.71, p < 0.001, MSE = 0.39$ ) and no significant differences between others conditions (i.e., Load 4 and 6; Load 4 and 8; Load 6 and 8,  $p > .6$  in every case). To test our hypothesis that a plateau was reached after maximal span was exceeded, we applied a Helmert contrast which compares a level with all subsequent levels (e.g., Load 2 vs. the mean of Loads 4, 6,

and 8; Load 4 vs. the mean of Loads 6 and 8, etc.). The first level comparison indicates a large load effect, a significant increase in negativity at the electrodes of interest between Load 2 and the mean of Loads 4, 6, and 8, ( $F(1, 24) = 51.03, p < .001, MSE = 19.13, \eta_p^2 = 0.68$ ). Comparisons of Load 4 vs. Loads 6, and 8 and Load 6 vs. Load 8 do not indicate significant load effects ( $F(1, 24) = 2.75, p > 0.1, MSE = 16.51, \eta_p^2 = 0.10$ ;  $F(1, 24) = 0.23, p > 0.5, MSE = 30.47, \eta_p^2 = 0.01$ ). Therefore, the negative amplitude of the sustained component, observable at fronto-central electrodes, increased between Loads 2 and 4 but reached a plateau between Loads 4 and 8.

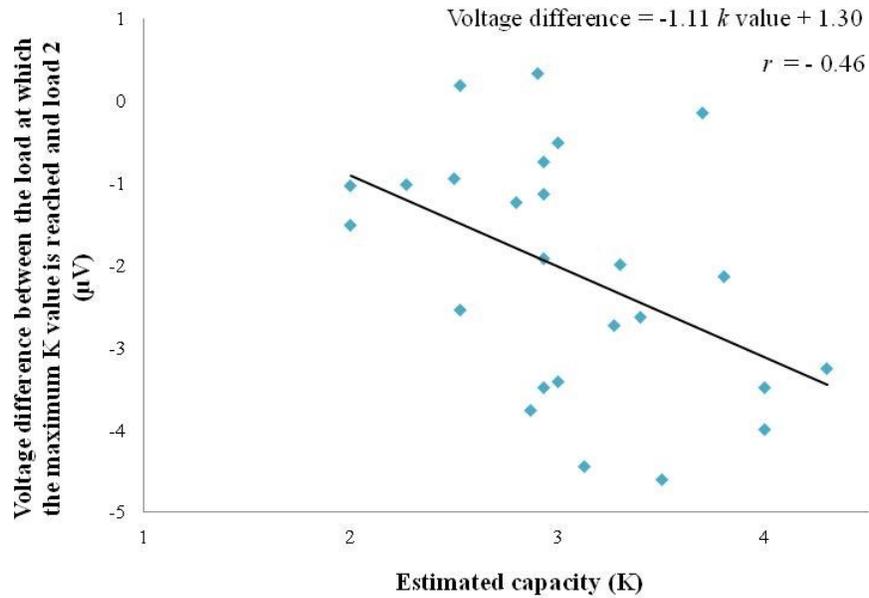
As can be seen Figure 3, an interaction effect between the memory load and the anterior-posterior electrode position was found during the retention phase ( $F(4.23, 101.39) = 3.44, p < .015, MSE = 645.16, \eta_p^2 = 0.13$ ). There was an anterior shift of activation: a larger activation in negativity at central electrodes position (F3, Fz, and F4) at Load 2 and a larger activation at those and anterior electrodes position (AF3, AFz, and AF4). Importantly, the largest difference of activation between Loads 2 and 4 was found at the anterior electrode position (-2,92  $\mu$ V, compared to -1,74 and -1,59 at central and posterior electrode positions, respectively, within this cluster of electrodes). This is consistent with the distribution of activation during retention of auditory memory tasks measured in previous studies (Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013; Nolden et al., 2013).

During the encoding phase, ranging from -1700 to 0 ms relative to the end of the first sequence, a set of negative ERP components in response to the sounds in the first sequence was observed. Only the first white noise produced a large N1-type response, while subsequent tones each produced a clear auditory N1. N1 responses to white noises, particularly after the

first one, were smaller suggesting that they were encoded differently (Näätänen & Picton, 1987; Salo et al., 2003).

The ANOVA results also showed a laterality effect on electrode position during the retention phase ( $F(1.94, 46.60) = 5.55, p < .01, MSE = 2765.55, \eta_p^2 = 0.19$ ). Activation was more negative at the midline electrode position than left or right electrode positions (left:  $-3.6 \mu\text{V}$ ; central:  $-4.7 \mu\text{V}$ ; right:  $-2.7 \mu\text{V}$ ), indicating that the activation was mostly central and thus corroborating the results of Guimond et al. (2011) and Lefebvre et al. (2013).

Finally, we examined the relationship between individual differences in memory capacity and individual differences in the amplitude change of the SAN as memory load increased in an aim to verify if participants' abilities and the amplitude of the SAN were interdependent (Lefebvre et al., 2013). We estimated the maximum capacity (K) for each participant, as well as the amplitude difference (in  $\mu\text{V}$ ) of the SAN between the amplitude for the load condition at which the maximum K was reached and the amplitude at Load 2. We found a significant positive correlation ( $r = .46, p < .023$ ) between these two variables: when the maximum K value was higher, the voltage difference was also higher. The scatter plot and regression line are shown in Figure 4.



*Figure 4.* Voltage difference of neuronal activity ( $\mu\text{V}$ ) between the load at which the maximum K value is reached (4, 6, or 8 tones) and Load 2 related to the maximum K value for each participant.

### 3. Discussion

The aim of the current study was to investigate the capacity limits of ASTM by measuring neuronal activity related to the maintenance of pitch information under different levels of memory load. It also afforded us the opportunity to describe further the characteristics of the SAN, which we believe to be a sensitive index of ASTM load.

In our behavioral results, we noted a significant decline of accuracy with the number of items to be held in ASTM (2, 4, 6, or 8 tones) and, therefore, the memory load and task difficulty increased. We calculated the mean of K values for each load (2, 4, 6, and 8 tones; Pashler, 1988; Cowan, 2000) and noted a significant increase between Loads 2 and 4 and a leveling off thereafter (see Figure 1). The maximum mean of K was 2.84 tones at Load 4, which is consistent with other findings in audition literature such as 2.9 and 2.01 tones at Load 6 from Prosser (1995) and Li, Cowan & Saults (2013), respectively. Our Behavioral analyses thus suggest that the auditory span of our participants was exceeded after 3 or 4 tones, though differences in methodological details between experiments (such as frequency and duration of tones) will influence the K values. It is also possible that the auditory span found in this study is overestimated relative to the general population given that only those subjects who passed our screening test participated (see Screening in Methods section). The mean of K dropped significantly from 6 to 8 tones, likely reflecting that some proportion of subjects with low Ks had particular difficulty at 8 tones. Importantly, the suggestion that no more information entered ASTM was corroborated by a stable SAN amplitude across Loads 4 to 8.

The principal effect observed in our electrophysiological results was a clear load-dependent negative deflection at fronto-central electrodes (see Figures 2 and 3) during the retention of tone sequences and this activity became more negative with increasing load until reaching the capacity limit of ASTM (see Figure 2A and 3), beyond which point the negativity persisted at stable levels (see Figure 2B, 2C and 3). Its distribution is similar to those found in studies on the maintenance of pitch (Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013). In other words, the presentation of additional tones no longer modulated the amplitude of the SAN beyond the behavioral saturation point of ASTM, which is consistent with the interpretation

that the SAN reflects memory load. With a maximum sequence length of 6 tones and no screening for individual ASTM capacity, the amplitude of the SAN increased with load without reaching a clear plateau in the work of Lefebvre et al. (2013). However, our task, in which the differing sequence contained is single changed tone, was more difficult than that of Lefebvre and colleagues where two tones were interchanged. It is therefore not surprising that a saturation point was reached sooner in the present study.

The main component we have described in our results has all the hallmarks of a SAN. It occurs during a retention interval (900–1500 ms after the last tone of the first sequence is presented), is strongest at fronto-central electrodes (Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013), and shows for the first time a load-dependent amplitude that no longer increases once maximum ASTM span is reached. Thus, we claim that we have isolated a SAN that serves as an electrophysiological index of the maintenance of auditory information in ASTM.

Though our methodology reduced the likelihood of activating semantic, linguistic, or phonological codes, and likely excluded contamination from encoding or retrieval operations, we could not exclude the possible use of covert mnemonic strategies, such as rehearsal. Importantly, however, the impact of rehearsal on the SAN component was evaluated by Guimond et al. (2011) using concurrent verbal suppression (Schendel & Palmer, 2007). Their results showed convincingly that verbal rehearsal cannot be the most relevant mnemonic activity changing load effect during the retention phase. Having a load-dependent ERP that is very similar across Guimond et al. (2011) and the current study narrows down the specific processes common to both experiments, which are very likely related to the retention of low-level acoustic features. This suggests that the SAN reflects neuronal activity directly involved in the maintenance of auditory representations in ASTM.

Guimond et al. (2011) and Lefebvre et al. (2013) have argued that the SAN is related to the maintenance of acoustic information and not the difficulty of the tasks which might be indexed by a contingent negative variation (CNV). One of their arguments was that the scalp distribution of ASTM activation is considerably more anterior/frontal than that of a typical CNV related to the increase of effort (Falkenstein, et al., 2003). Indeed, in our study, we observed a greater activation at the anterior-frontal and frontal electrodes as compared to the fronto-central electrodes. Another point made by Lefebvre et al. (2013) was that the SAN is present in the maintenance of acoustic items but not the maintenance of visual items despite equivalent or greater task difficulty and very similar retention delays and task structures. The present work can provide yet another argument to consolidate the notion that the SAN was related to the maintenance of tones. The amplitude of a CNV would have continued to increase in negativity as the task became more difficult, past the maximum ASTM span of our subjects. The SAN, however, reached a plateau that corresponded to the behaviorally verified maximum of information held in ASTM as in studies involving visual stimuli (Vogel & Machizawa, 2004).

Importantly, changes in the amplitude of the SAN with load conditions was a significant predictor of individual differences in behavioral performance in the ASTM task (Figure 4), supporting our hypothesis that the SAN is a specific index of neuronal activity contributing to retention in ASTM.

Our results, together with other work from our lab and the larger interested community, lead us to postulate that STM for visual and auditory modalities recruit largely distinct brain regions, although it is likely that these memory networks are partially overlapping. The two components related to the maintenance of information in STM (SAN for audition, SPCN for

vision) were similarly modulated by memory load (Vogel & Machizawa, 2004; Guimond et al., 2011) and predicted by K values (Robitaille et al., 2010; Lefebvre et al., 2013). Results suggest strongly the involvement of specialized infrastructures for each type of information and their simple maintenance (Postle, 2006). This is reflected in the different scalp distributions of ASTM and VSTM EEG activity (i.e., posterior electrodes for visual information, fronto-central electrodes for auditory information), which supports, in turn, the notion that they do not depend on identical networks of cerebral structures working in concert (Grimault et al., 2009; Robitaille et al., 2010; Guimond et al., 2011; see Lefebvre et al., 2013, for a direct comparison of VSTM and ASTM). It seems, therefore, that the network of regions underpinning VSTM and ASTM at least partially diverges in modality-specific ways. Common activations may be related to the recruitment of executive areas, such as the prefrontal and the parietal cortex, implicated in monitoring of information to reinforce the maintenance and perhaps re-activate representation in the primary memory store (Chamod & Petrides, 2007; Edin et al., 2009; Chuderski et al., 2013).

To conclude, the current study contributes to a better understanding of the mechanisms of maintenance of basic auditory information, such as pitch, in ASTM. The present work provides converging evidence for the hypothesis that the SAN component is an index of brain activity reflecting persistent neuronal activity in support of a short-term memory system for auditory information. Its amplitude increases in negativity with number of items until reaching a maximum span, after which it levels off. The SAN amplitude is also predicted by estimated behavioral ASTM capacity (as indexed by Cowan's K). This is important to the comprehension of ASTM, a mechanism essential to the integration of auditory information and omnipresent in daily life.

## 4. Methods

### 4.1. Participants

One hundred and one right-handed students from Université de Montréal, who reported no neurological problems and normal hearing, completed a music training questionnaire (translated to French from Hyde et al, 2009) and performed the two behavioral screening tasks described below (see section 4.3). All participants gave informed consent and procedures were vetted by the ethics committee of the Faculty of Arts and Science at the Université de Montréal. From this group, thirty participants participated in the full 2-hour EEG experiment. Recruitment ended once thirty participants had surpassed the performance criteria for the screening tests and who agreed to participate in the EEG experiment. Data from five participants were excluded from analysis because they contained a high number of artifacts such as blinks and eye movements. The remaining twenty-five participants (9 men) had a mean age of 22 years. According to their answers to the musical training questionnaire (Hyde et al., 2009), 11 were considered as musicians and 14 as non-musicians. To be considered as a musician, participants had to report they had 3 or more years of musical experience without any interruption lasting more than 5 years.

### 4.2. Stimuli

Auditory material used in the screening tasks and the ERP experiment were atonal sequences of pure tones differing in pitch (Trehub et al., 1999). The frequencies of pitches ranged from 380 Hz to 1375 Hz (380, 419, 463, 511, 564, 623, 688, 759, 838, 925, 1022, 1128, 1245, and 1375 Hz) and were created by multiplying the starting frequency and each resulting frequency by  $2^{1/7}$  to make 14 equal logarithmic steps over two octaves (as used in

Guimond et al. 2011 and Lefebvre et al., 2013). The sequences formed therefore are characterized as ‘atonal’ because they do not correspond to the subdivisions of western musical scales or, indeed, any known scale when selected randomly from the 14 tones and were thus less likely to make use of implicit or explicit musical knowledge or memories.

#### *4.3. Screening*

One hundred and one participants completed two behavioral screening tasks (mean of PEST score = 4, minimal PEST score = 2, maximal PEST score = 9.4 and SD = 1.51). Of this group, forty-four participants were invited to participate in the ERP experiment based on our selection criteria: 80% minimum accuracy in the first screening test, a PEST score larger or equal to 5 tones, and achieving at least once a maximum level larger or equal to 8 tones in the second screening test. Thirty participants agreed to perform the EEG task. Five participants were rejected from analysis due to high number of artefacts (more than 40% of the trials). Thus, twenty-five participants were retained for our main EEG analysis (mean of accuracy = 96%, mean of PEST score = 6.28, SD = 1.16 and mean  $k = 2.70$ ).

The first task evaluated the participants’ ability to discriminate two different tones that varied in pitch by either one or two steps in the artificial scale described above (e.g., one step from 511 Hz would entail the presentation of either a tone at 463 or 564 Hz, whereas two steps would use either the 419 or 623 Hz tone). This task was designed to ensure that participants could easily discriminate the tones that would change in a “different” trial (see below).

To ensure that the participants would be able to complete the EEG task, we designed a more discriminatory second screening task. This task was based on an automated Parameter Estimation by Sequential Testing (PEST) procedure. The PEST allows to control the levels of up and down, the number of repetition of each level and the end of the task with different parameters that we can fix as our convenience. We adapted this procedure to our experiment (Taylor & Douglas Creelman, 1967; Leek, 2001; Conway, 2005). As in the EEG task, two sequences of tones, separated by a silent retention interval of 2000 ms, were either identical or differed by one tone that could be  $\pm 2$  steps away from the original. Participants had to determine if these sequences were identical or not. The initial and smallest memory load was a sequence of 2 tones, and the maximum load was 8 tones. To step up to a higher memory load level (one tone added to the sequence), four consecutive correct responses at the same level were required. Three non-consecutive incorrect responses within the same load level resulted in a decrease in load level (one tone subtracted from the sequence). Overall then, load level increased when the participant had a good success rate and decreased when they had a poor success rate, resulting in direction changes across load (increase vs. decrease). After eight direction changes, the screening task ended. As shown in figure 5, the PEST score was calculated by averaging the number of tones in each load level that resulted in an increase to the next load level (direction changes). The number of tones at these threshold levels allowed for a good success rate for given participant. Given that 5 tones is approximate average of number of tones to be maintained in sequences used in our EEG task (2, 4, 6, and 8 tones), we established a score greater or equal of 5 tones as the first selection criteria for this screening. When the level was too difficult, the accuracy usually decreased and the level was lowered to a minimum threshold level. A second criterion was that our subjects should reach a maximum

level greater or equal than 8 tones at least once, to ensure that they would not find our EEG task too difficult,

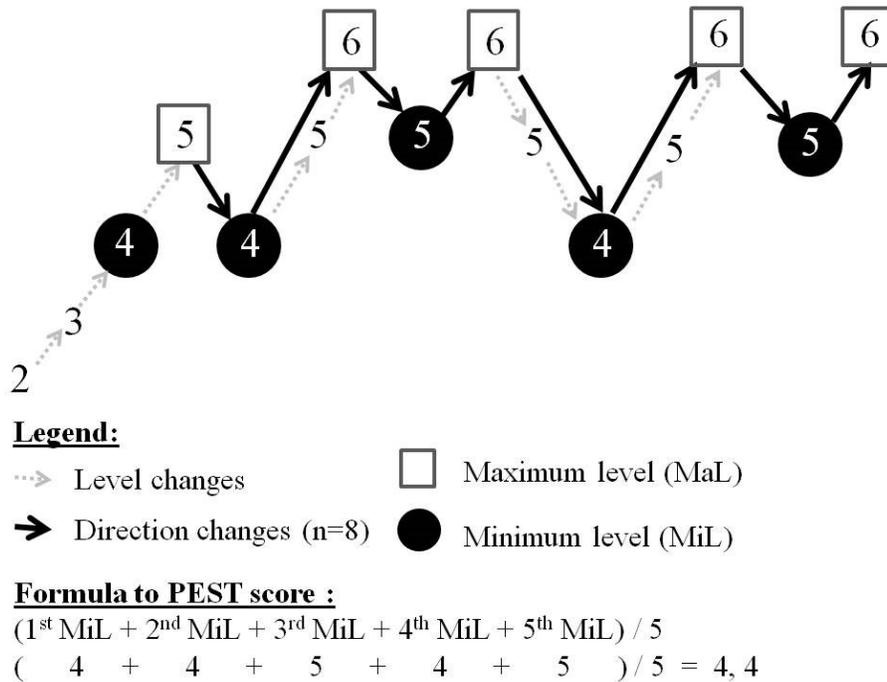


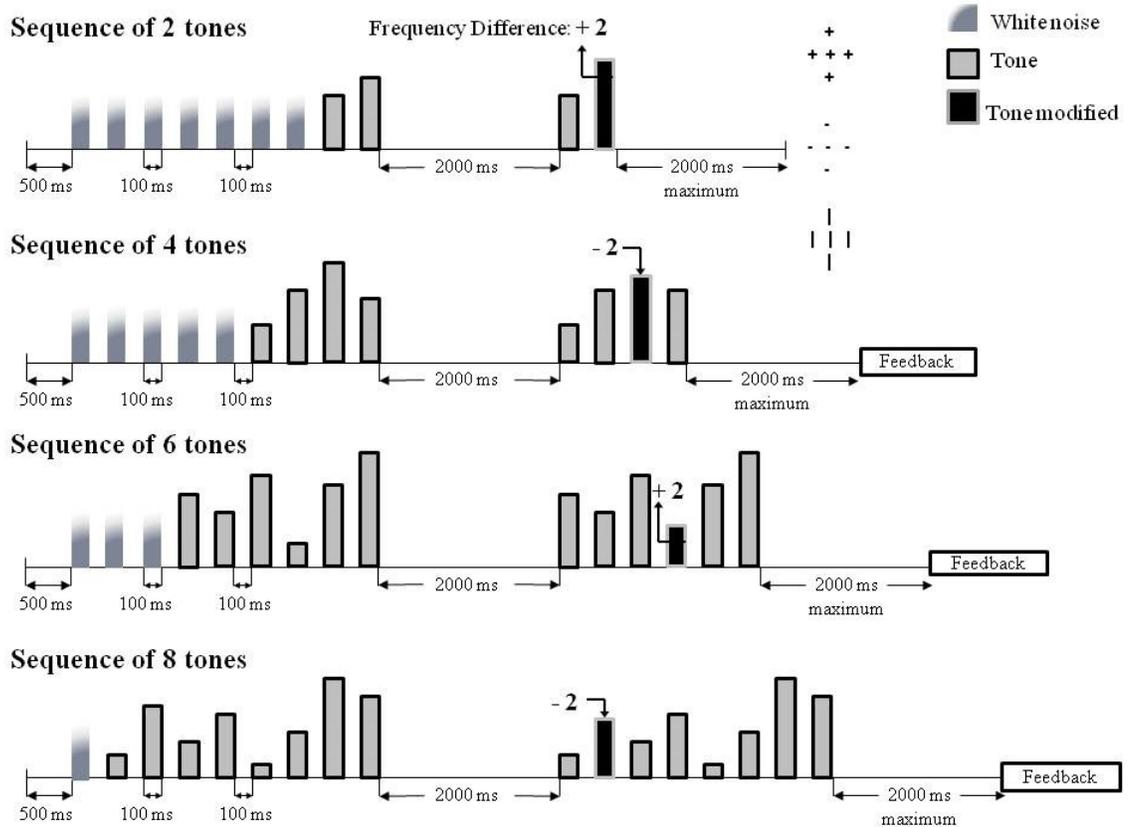
Figure 5. Example of one PEST test result. Number of tones presented in each level separated by arrows pointing to one level up or down. The span was computed as the mean of number of tones of all minimum thresholds.

#### 4.4. Procedure

Participants performed the EEG experiment in an electrically shielded room and were seated in front of a shielded computer monitor. Each trial started with the onset of a white fixation cross at the center of the screen and lasted until participants gave a response. All participants were instructed to maintain their eyes at the fixation cross and to avoid blinking during the trial.

Each trial contained two atonal sequences of either 2, 4, 6, or 8 pure tones (*see* Figure 6), the use of such stimuli minimizing associations with known sounds. Stimuli were presented to both ears at 65 dB SPL via Etymotics ER-1 earphones and soft plastic ear inserts. Each tone had a duration of 100 ms including onset and offset ramps lasting 20 ms each and tones within a sequence were separated by 100 ms silent intervals. White noises were used to equalize the number of acoustic stimuli heard across load conditions and to ensure that retention began at the same time in all conditions. Hence, the first sequence was preceded by either 7, 5, 2, or 1 white noises (in the case of sequences of 2, 4, 6, or 8 tones, respectively). The white noises could be ignored and not encoded in ASTM because they were sufficiently different from the tones (Lefebvre et al., 2013). A first sequence was presented during the encoding phase and a second during the retrieval phase; the two sequences being separated by a silent retention interval of 2000 ms. The second sequence contained only tones varying in pitch (no white noise).

In half of the trials, the sequences were identical, and in the other half, they were differed by  $\pm 2$  steps (*see* 4.2.Stimuli) of one tone selected randomly in the second sequence. As the melodic contour was not controlled, the contour of the second sequence was sometimes the same and sometimes different in ‘different’ trials (*see* Figure 6), but the procedure that we used reduced the proportion of sequences that had different contours compared to Lefebvre et al. (2013) in which different trials were created by inserting the order of two adjacent tones in a sequence. Importantly, participants could not determine whether the contour would be the same or not, and therefore the memorisation of only the melodic contour as a mnemonic strategy was not optimal.



*Figure 6.* Example of a ‘different’ trial with the same melodic contour. Presentation of sequences (2, 4, 6, and 8 tones) equalized to 9 auditory stimulations with white noises. Shown here are all ‘different’ trials to illustrate how we changed the tone that changed on such trials. The second sequence was the same as the first on ‘same’ trials.

Participants had to indicate whether the sequences were identical or not with a keyboard press (C with left hand; N with right hand). Half of participants used their left hand for the “same” response and their right hand for the “different” response, with the mapping reversed for the other half. Accuracy feedback was presented with a “+” indicating a correct response, a “-” indicating an incorrect response, and a “|” indicating that no response was given within 2000 ms after the last tone in the second sequence. Participants pressed the space bar after each presentation of feedback to start the next trial.

The ASTM task contained 16 practice trials followed by 12 experimental blocks, each containing 40 trials, thus resulting in 120 trials per load condition. All practice trials were excluded from the analyses. Trials were sampled randomly without replacement, with each load condition (2, 4, 6, and 8 tones) being presented equally often in each block. Following each block in the ASTM task, the percentage of correct responses for each load was presented on the screen.

#### *4.5. Electrophysiological recording and statistical analyses*

Continuous EEG activity was recorded at a sampling rate of 512 Hz using 64 ActiveTwo Ag/AgCl electrodes. These electrodes were mounted on an elastic cap at Fp1, Fpz, Fp2, AF7, AF3, AFz, AF4, AF8, F7, F5, F3, F1, Fz, F2, F4, F6, F8, FT7, FC5, FC3, FC1, FCz, FC2, FC4, FC6, FT8, T7, C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, T8, TP7, CP5, CP3, CP1, CPz, CP2, CP4, CP6, TP8, P9, P7, P5, P3, P1, Pz, P2, P4, P6, P8, P10, PO7, PO3, POz, PO4, PO8, O1, Oz, O2 and Iz, using international 10–10 nomenclature. The recording was done with the BioSemi ActiveTwo system. Horizontal eye movements were captured by horizontal electrooculogram electrodes (HEOG) and were measured by the voltage difference between these two external electrodes positioned laterally to left and right sides of the eyes. To monitor eye blinks, the voltage difference between an electrode placed below the left eye and the Fp1 was measured (vertical electrooculogram, VEOG). Two other external electrodes were placed on the left and right mastoids. The EEG recording was re-referenced off-line to the average of these two electrodes.

ERP results were analyzed offline by applying a 0.01-Hz high-pass filter and a 5-Hz low-pass filter to the continuous recording. The data segmentations started at 500 ms before the first sequence and ended 2000 ms after the onset of the retention interval (i.e., beginning of the second sequence). Baseline correction was performed using the average voltage from 200 ms before the first sequence to the onset of the first sequence. Trials containing blinks (VEOG > 50  $\mu$ V in a 150 ms interval), eye movements (HEOG > 35  $\mu$ V in a 200 ms interval), EEG artefacts (any channel with a voltage change larger than 100  $\mu$ V in a 50 ms interval), and apparent EEG artefacts detected by visual inspection (on previously undetected noisy trials) were removed prior to ERP averaging. Trials with both correct and incorrect responses were kept as the task was designed to exceed participants' span and therefore yielded a high number of errors in the highest load conditions (see Results, section 2.1. behavioral data). Note that analyses conducted with only correct responses were congruent with those presented in Figure 3, though the number of trials (< 60 trials by condition) was not sufficient to obtain a reliable EEG analysis.

Analyses focused on the data collected during the retention interval from 900 ms to 1500 ms after onset of the retention phase to isolate the SAN. This window within the retention phase was used to avoid any late sensory or encoding activity as well as activity related to the anticipation of the probe. Differences for accuracy and K values between loads in the behavioral data and voltage differences in electrophysiological data were analyzed with repeated-measures ANOVA. We reported the within-subject effect test with a Greenhouse-Geisser correction. Pairwise comparisons were made to isolate significant effects when comparing within-subject factors. In addition, a Helmert contrast was applied on the memory load factor to highlight the formation of a plateau.

## Méthodes supplémentaires

Deux questionnaires ont été distribués avant et après la tâche expérimentale en EEG aux participants. Sur le 25 participants, 25/25 ont répondu au premier questionnaire, et 19/25 ont répondu au second (questionnaire retourné par courriel).

Le premier questionnaire portait sur l'expérience musicale (Annexe 1; traduit de Hyde et al., 2009). Nous avons déterminé si le participant était musicien ou non d'après sa réponse à la première question du questionnaire : « Te considères-tu comme un musicien ou non? ». Nous avons donc considéré qu'il y avait 14 musiciens et 11 non-musiciens dans notre échantillon. Une ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs, soit un facteur intrasujet à 4 niveaux (charge en mémoire; 2, 4, 6 ou 8 sons) et un facteur intersujet à 2 niveaux (2 groupes; musiciens et non-musiciens) a été effectuée afin d'évaluer la différence entre les musiciens et les non-musiciens sur leur valeur K obtenue à la tâche.

Le second questionnaire portait sur la perception des participants quant à leur utilisation de stratégies mnésiques pendant la tâche expérimentale en EEG (Annexe 2; basé sur Fort, 2005). Sur les 19 participants ayant répondu à ce questionnaire, 11 d'entre eux ont été considérés comme musiciens et 8 comme non-musiciens selon le premier questionnaire sur l'expérience musicale. Une analyse qualitative de ce questionnaire a été réalisée et la proportion en pourcentage de participants ayant utilisé chacune des stratégies mnésiques a été calculée.

## Résultats supplémentaires

Les résultats supplémentaires à l'article inclus dans ce mémoire seront présentés ci-dessous. Dans un premier temps, des résultats comportementaux et expérimentaux sur les différences musiciens et non-musiciens seront présentées. Par la suite une analyse qualitative et quantitative de la perception des participants quant à leur utilisation de stratégies mnésiques pendant la tâche cognitive en audition sera décrite. Nous terminerons enfin par discuter de l'effet de la position des sons sur la performance.

### Comparaison des musiciens et des non-musiciens

#### Section 1. Résultats comportementaux

Une ANOVA à mesures répétées avec une correction de Greenhouse-Geisser a montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes (musiciens et non-musiciens) au niveau de leur performance calculée en pourcentage dans la tâche expérimentale en EEG (charge :  $F [2.3, 53] = 276.134, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.923$ ; groupe :  $F [1, 23] = 0.674, p > 0.40, \eta_p^2 = 0.028$ ; interaction entre charge et groupe :  $F [2.3, 53] = 0.333, p > 0.700, MSE = 0.003, \eta_p^2 = 0.014$ ).

La figure 5 présente la capacité de l'ASTM estimée par K pour chaque charge en mémoire (2, 4, 6 et 8 sons) et ce, pour les musiciens et les non-musiciens à des fins de comparaison. Une ANOVA à mesures répétées avec une correction de Greenhouse-Geisser a révélé qu'il n'y avait aucune différence significative entre les deux groupes quant à leur capacité de l'ASTM estimée par K pour chaque charge en mémoire (charge :  $F [2.06, 47.35] = 17.826, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.437$ ; groupe :  $F [1, 23] = 0.237, p > 0.60, \eta_p^2 = 0.01$ ; interaction entre la charge et groupe :  $F [2, 47.3] = 0.383, p > 0.650, MSE = 0.46, \eta_p^2 = 0.016$ ). Ces

résultats sont cohérents avec notre hypothèse que l'utilisation des sons non-musicaux variant en hauteur tonale tend à minimiser l'implication de certains sous-systèmes de mémoire auditive, comme ceux impliqués dans la connexion de l'information avec une potentielle mémoire musicale à long terme.

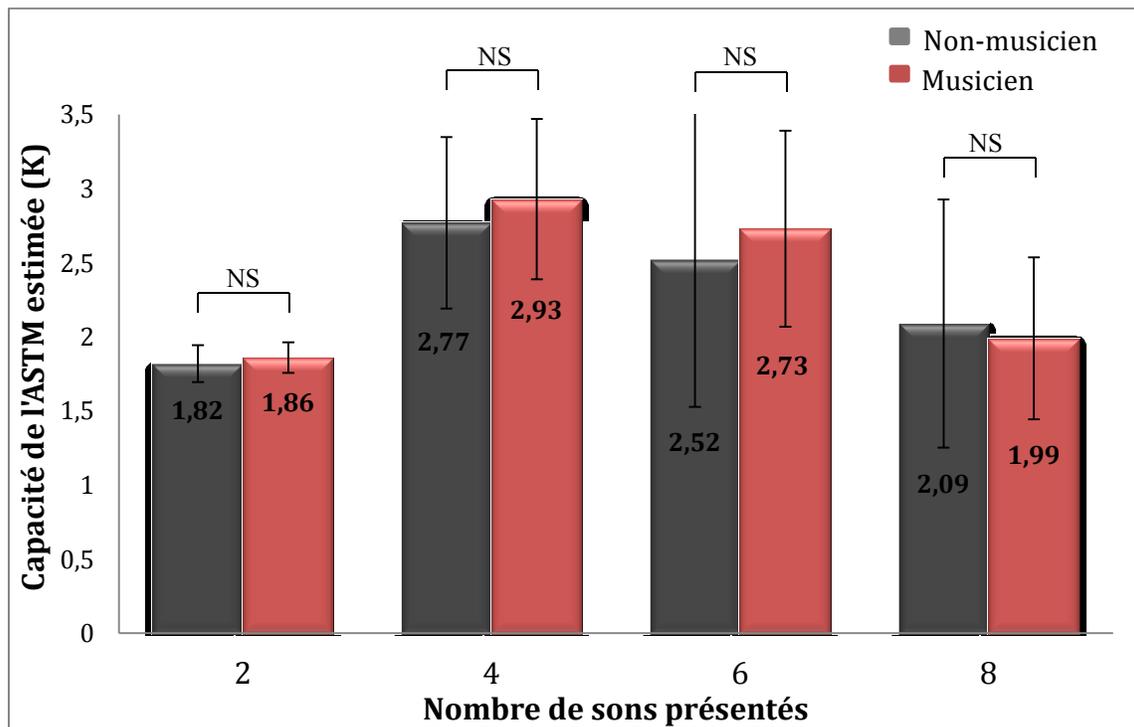


Figure 5. La capacité de l'ASTM estimée par K des musiciens et des non-musiciens pour chacune des charges en mémoire (nombre de sons présentés : 2, 4, 6 ou 8 sons).

## Section 2. Résultats électrophysiologiques

Une analyse posthoc des résultats de la tâche expérimentale en EEG a été réalisée en séparant le groupe musiciens du groupe non-musiciens, afin d'y observer les différences. Une ANOVA à mesures répétées avec un contraste de type Helmert a montré que l'effet de charge était maintenu (2 sons vs. 4, 6 et 8 sons :  $F(1, 23) = 31.08, p < 0.001, SEM = 2.84, \eta_p^2 = 0.58$ ) et qu'il n'était pas influencé par le groupe (2 sons vs. 4, 6 et 8 sons :  $F(1, 23) = 1.04, p > 0.3, \eta_p^2 = 0.043$ ). Cette même ANOVA a montré que la SAN des musiciens tendaient à être plus positive ( $F(1, 23) = 1.84, p > 0.18, \eta_p^2 = 0.074$ ).

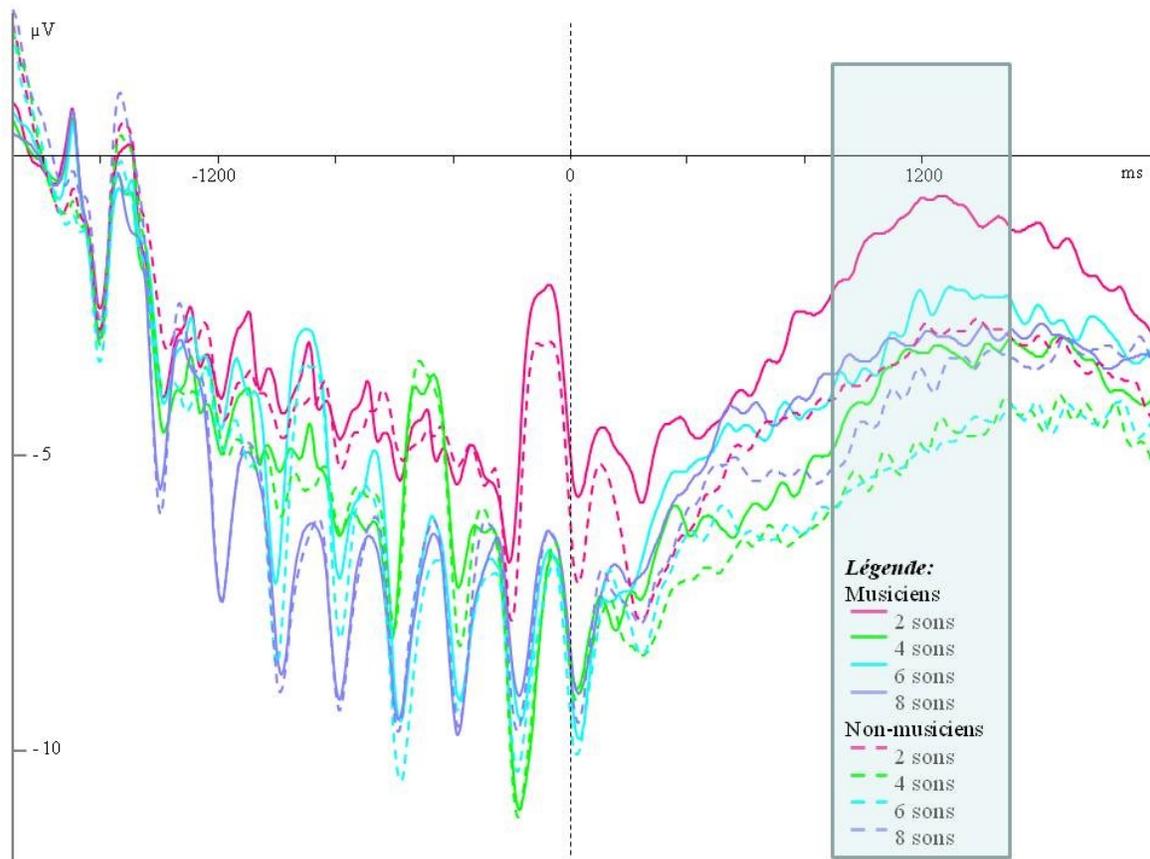


Figure 6. Grand moyenne des signaux PRE au niveau des électrodes fronto-centrales (AF3, AFz, AF4, F3, Fz, F4, FC3, FCz et FC4) des musiciens et des non-musiciens pour chacune des charges en mémoire (2, 4, 6 et 8 sons).

## **Perception des participants quant à leur utilisation de stratégies mnésiques**

Une analyse qualitative de la perception des participants quant à leur utilisation de stratégies mnésiques pendant la tâche expérimentale en EEG a été faite. Les pourcentages d'utilisation ont été calculés en fonction du nombre de participants ayant utilisé chacune des stratégies décrites ci-dessous (p. ex. 7 participants ont utilisé une stratégie sur les 19 ayant répondu au questionnaire: 7/19 ou 37%). Ceux des sous-catégories ont été calculé en fonction du nombre de participants ayant préalablement utilisé la stratégie mnésique de la même catégorie (p. ex. 5 participants ont utilisé cette sous-catégorie sur les 7 ayant répondu avoir utilisé la stratégie caractérisant la catégorie : 5/7 ou 72%). Dans cet exemple, il y aurait donc 37% des participants qui ont la perception d'avoir utilisé une des stratégies et 72% d'entre eux, la sous-catégorie. Plusieurs points saillants ressortent de cette analyse. Tous les participants ont dit avoir utilisé plusieurs stratégies mnésiques lors de la tâche expérimentale et ils ont tous affirmé avoir utilisé la répétition subvocale. La majorité de ceux-ci ont dit avoir maintenu des changements de tonalité (84%) et des repères sonores (95%). Le début et la fin des séquences ont été perçus comme plus maintenus que le milieu des séquences (71%). Les non-musiciens semblent utiliser des stratégies plus populaires dans la littérature, tels que la répétition, les changements de tonalité et les repères sonores. Quant aux musiciens, ils semblent utiliser des stratégies se rapportant davantage à leur connaissance de la musique, tels que l'image mentale et les associations. Pour finir, la moitié des participants semblent se fier à l'évocation sonore plutôt que l'utilisation de stratégies mnésiques pour les séquences considérées longues (6 et 8 sons).

Tableau 1. Analyse quantitative et qualitative de la perception des participants quant à leur utilisation des stratégies mnésiques lors d'une tâche cognitive auditive.

Stratégies mnésiques	Perception de l'utilisation de ces stratégies par les participants (%)
<b>Utilisation de plusieurs stratégies</b>	<b>100%</b>
<b>1. Répétition subvocale</b>	<b>100%</b> Utilisée jusqu'à 5.8 sons en moyenne. <i>Tends à être plus utilisée par les non-musiciens.</i>
<b>2. Maintenir les changements de tonalité</b>	<b>84%</b> <i>Tends à être plus utilisée par les NM.</i>
<b>3. Maintenir des repères sonores</b>	<b>95%</b> Les sons plus aigus, qui sortent de l'ordinaire ou plus graves ont été maintenus. Sons plus aigus : 78% Sons qui sortent de l'ordinaire : 67% Sons plus graves : 11% Répétition subvocale de ces repères sonores et/ou changements de tonalité : 32% Autre façon de les mémoriser : 26% Par exemple : mouvement des mains. <i>Tends à être plus utilisée par les non-musiciens.</i>
<b>4. Maintenir la (les) position (s) des repères sonores et/ou changements de tonalité</b>	<b>89%</b> Lorsque les sons sont présentés : Début et fin : 71% Seulement à la fin : 12% Début et milieu : 12% Milieu et fin : 6%
<b>5. Nombre de repères sonores et/ou changements de tonalité maintenus</b>	En moyenne, <b>3.4 sons.</b>

<b>6. Image mentale</b>	<b>53%</b> Par exemple : Graphique, partition, clavier, manche de guitare, etc. <i>Tends à être plus utilisée par les musiciens.</i>
<b>7. Associations entre les sons</b>	<b>21%</b> Par exemple : Association avec des sons connus. <i>Tends à être plus utilisée par les musiciens.</i>
<b>8. Évocation sonore (pas de stratégie)</b>	<b>58%</b> L'évocation sonore peut être utilisée pour les séquences plus courtes, plus longues ou par inattention. Séquences longues (6 et 8 sons) : 64% Séquences courtes : 18% Par inattention : 18% <i>Tends à être plus utilisée par les non-musiciens.</i>
<b>9. Nombre de sons maintenus</b>	En moyenne, <b>5 sons</b> .

## Résultats sur l'effet de la position sur la performance

Dans la tâche expérimentale en EEG, les séquences pouvaient être identiques ou différentes. Dans le cas où les séquences étaient différentes, le son différent de la deuxième séquence changeait de position de façon aléatoire à travers les essais. Pour évaluer l'effet de primauté et de récence dans notre expérience, la performance moyenne en pourcentage des participants pour chaque charge en mémoire (2, 4, 6 et 8 sons) selon la position du son changé a été calculée. Les résultats ont montré que la performance diminuait plus la charge en

mémoire augmentait. Cependant, pour une même charge, la performance tend à être meilleure pour les séquences identiques et lorsque le son changé est le dernier de la séquence.

Tableau 2. Effet de la position des sons dans une séquence sur la performance des participants.

Charge en mémoire	Performance (%)								
	Séquences identiques	Séquences différentes							
		1 <sup>er</sup> son	2 <sup>e</sup> son	3 <sup>e</sup> son	4 <sup>e</sup> son	5 <sup>e</sup> son	6 <sup>e</sup> son	7 <sup>e</sup> son	8 <sup>e</sup> son
2 sons	96,75	91,09	98,91						
4 sons	90,92	71,17	77,10	73,94	94,37				
6 sons	80,38	59,09	57,84	52,30	60,26	60,50	86,57		
8 sons	72,21	52,97	50,88	47,68	49,11	50,21	45,76	57,78	81,62

## Discussion

L'objectif majeur de la présente étude était d'investiguer les limitations de la MACT. Selon plusieurs études comportementales, la MACT serait limitée dans sa capacité à maintenir des stimuli auditifs (Prosser, 1995; Cowan, 2000; Li, Cowan & Saults, 2013). Par contre, aucune étude au meilleur de nos connaissances n'a étudié le dépassement de la capacité de la MACT et ses effets en électrophysiologie. Tout récemment, une nouvelle composante électrophysiologique, la *Sustained Anterior Negativity* (SAN), a été isolée et son amplitude serait modulée par le nombre de sons variant en hauteur tonale à maintenir dans la MACT (Guimond et al., 2011; Lefebvre et al., 2013). Par l'entremise de la SAN et de l'empan mnésique (EM) auditif, nous avons développé un paradigme de recherche afin d'étudier le dépassement de la capacité limitée de la MACT en électrophysiologie. Pour inciter les participants à maintenir les sons de nos séquences (2, 4, 6 et 8 sons) individuellement, la moitié des séquences différait par un seul son qui variait de position de façon aléatoire et de tonalité selon un écart de  $\pm 2$  intervalles dans notre gamme expérimentale (plus aigu ou plus

grave que le son initial). Ces restrictions méthodologiques nous ont permis de diminuer les changements du contour mélodique, contrairement à l'étude de Lefebvre et al. (2013), dans laquelle deux sons étaient simplement interchangés, modifiant ainsi le contour à chaque essai.

Considérant que l'EM auditif semble plutôt bas, en dessous de 3 sons (Prosser, 1995; Li, Cowan & Sauls, 2013) et que les tâches auditives séquentielles peuvent conduire plus facilement à l'abandon, il était nécessaire de faire une présélection des participants afin de maximiser les chances de réussite quant à notre tâche expérimentale en électroencéphalographie (EEG). Pour ce faire, nous avons élaboré deux expériences comportementales à des fins de sélection : une tâche de discrimination entre 2 sons et une seconde dont le score donnait un portrait général de l'habileté des participants à différencier deux séquences de sons avec différentes charges en mémoire selon une procédure de *Parameter Estimation by Sequential Testing* (PEST; Taylor & Douglas Creelman, 1967; Leek, 2001; Conway, 2005). Ces expériences préalables à la tâche expérimentale ont donc permis de sélectionner des participants, d'une part, capables de distinguer les sons de notre expérience entre eux et d'autre part, ayant le potentiel de réussir notre tâche expérimentale.

### **La capacité limitée de la MACT**

Au niveau comportemental, nos résultats décrits dans l'article préalablement présenté ont montré une baisse de la performance à mesure que la charge en mémoire augmentait et l'atteinte d'un effet plafond des valeurs K à 4 sons. La baisse de la performance étant plutôt constante entre les différentes charges en mémoire (2, 4, 6 et 8 sons), il était difficile de s'y fier pour évaluer l'EM, tel que décrit par Cowan (2000). Pour ce qui a trait à la valeur K, le

maximum était de 2.84 sons, ce qui était cohérent avec les résultats de Prosser (1995) et de Li, Cowan & Saults (2013). Ce maximum atteint à 4 sons était suivi d'une légère diminution, d'où le terme effet plafond (*Voir* Figure 1 de l'article présenté ci-haut). La présence d'un effet plafond est également cohérente avec les résultats obtenus dans la littérature tant au niveau auditif (Li, Cowan & Saults, 2013) qu'en visuel (Robitaille et al., 2010). Nos résultats permettent donc d'appuyer la notion que la MCT, notamment la MACT dans notre cas, est bien limitée et ce, à un nombre d'items légèrement plus bas que pour les tâches équivalentes en visuel ou en verbal. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce résultat. Il semble que la mémorisation d'items similaires peut être plus difficile que pour des items très différents, par exemple Conrad (1964) aurait démontré que des mots et des lettres ayant une phonologie similaire étaient plus difficiles à maintenir que le contraire. Malgré le fait que nos participants soient capables de les différencier, les 14 sons utilisés dans notre expérience ont été créés à partir de 2 octaves. Alors, deux sons subséquents dans notre gamme expérimentale pouvaient être assez similaires pour que cet effet se produise. Dans le même ordre d'idées, des items à maintenir suivis par d'autres items dans la même modalité pouvaient interférer en supprimant la mémoire sensorielle des items à maintenir. Il semble que les participants doivent alors se rappeler de concepts plutôt que des sensations (Saults & Cowan, 2007; Li, Cowan & Saults, 2013). Dans notre étude, il est difficile d'identifier si les participants ont tenté de maintenir les concepts ou les sensations. Il faut se rappeler que les choix des stimuli s'est fait afin de minimiser l'implication de plusieurs sous-systèmes pouvant être plus ou moins reliés à la MACT, cela doit rendre d'autant plus difficile la maintenance de concepts.

Afin de compléter l'analyse comportementale de notre étude, des résultats supplémentaires au niveau de la différence musiciens/non-musiciens et de l'utilisation de stratégies mnésiques lors d'une tâche cognitive auditive ont été ajoutés à ce mémoire. Les résultats présentés à la section 4.1. ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative entre les musiciens et les non-musiciens pour leur performance ainsi que pour leur K. L'utilisation de sons purs non-musicaux tend donc à minimiser l'implication de certains sous-systèmes reliés à la MACT, notamment au niveau de l'expérience musicale.

Le questionnaire portant sur la perception de l'utilisation de stratégies mnésiques lors d'une tâche cognitive auditive s'est avéré être une approche intéressante pour évaluer leur nature et leur implication dans de telles tâches. Les participants ont perçu avoir utilisé une multitude de stratégies mnésiques afin de mener à bien leur mémorisation et ce, malgré le choix des stimuli. La répétition, la stratégie mnésique la plus connue dans la littérature, a également été la plus nommée par les participants (p. ex. Modèle de la MCT de Baddeley, 1974). Ce résultat n'est pas surprenant si on le place dans une situation réelle de la vie, par exemple, si vous deviez apprendre un numéro de téléphone sans pouvoir l'écrire, quelle méthode utiliseriez-vous pour le maintenir? Il serait probable qu'une proportion non négligeable d'entre vous aurait tout simplement répété le numéro dans sa tête le temps de pouvoir l'inscrire sur une feuille.

D'autres stratégies mnésiques plus spécifiques à l'audition ont également été utilisées, telles que les changements de tonalité (aiguë à grave ou grave à aiguë) qui se rapportent aux changements du contour mélodique et les repères sonores, par exemple un son grave qui devient saillant pour l'auditeur s'il se retrouve parmi plusieurs sons aigus. Les participants semblent indiquer un nombre qui s'apparente au K retrouvé lors de l'expérience (K maximal

de 2.84 sons), lorsqu'ils doivent estimer le nombre de changements ou repères maintenus en mémoire (moyenne de 3.4 sons). Cette estimation semble plus élevée, donc plus éloignée des résultats comportementaux, lorsque le nombre de sons maintenus est abordé (moyenne de 5 sons). La position de ses changements et/ou repères a été questionnée, la majorité des participants ayant utilisé cette stratégie (71%) ont perçu avoir maintenu davantage le début et la fin de la première séquence. Afin de vérifier cette perception, nous avons calculé la performance moyenne des participants pour chacune des charges en mémoire, lorsque les séquences étaient identiques et différentes, dans ce cas, selon toutes les positions du son différent de la deuxième séquence. Les résultats ont montré que la performance déclinait plus la charge en mémoire augmentait. Pour toutes les charges en mémoire, la performance pour les séquences différentes était plus élevée lorsqu'elle différait par leur dernier son et elle est comparable à celle obtenue pour les séquences identiques. Puisque la robustesse de l'effet de primauté dans certaines tâches cognitives est remise en question par quelques auteurs (Shaffer & Shiffrin, 1972; Baddeley, 2001), notre hypothèse est que seul un effet de récence est présent dans notre expérience. D'une part, la charge en mémoire étant aléatoire d'un essai à l'autre, il était difficile de prédire le nombre de sons que la première séquence pouvait contenir. D'autres parts, le choix des stimuli pouvait rendre difficile la maintenance des concepts, comparée aux sensations. Tous deux pourraient expliquer en partie l'absence d'un effet de primauté, qui serait supprimé par de l'interférence au sein même de la première séquence (Shaffer & Shiffrin, 1972).

D'autres stratégies mnésiques, moins étudiées dans la littérature, semblent également être utilisées par les participants, dont certaines avec une modalité différente de celle des stimuli présentés dans la tâche cognitive. Par exemple, les participants nomment avoir utilisés

l'image mentale (visuelle) ou le mouvement des mains (tactile) dans notre tâche cognitive en audition.

La distinction étant présente entre les musiciens et les non-musiciens, nous avons fait la proportion de chacun des deux groupes pour toutes les stratégies nommées dans le questionnaire. Les résultats montrent que les non-musiciens tendent à utiliser davantage les stratégies mnésiques plutôt de base, soit la répétition, les changements de tonalité et les repères sonores. Quant aux musiciens, ils semblent aussi utiliser les stratégies de base, mais en moins grande proportion que les non-musiciens. Ils tendent aussi à utiliser des stratégies que l'on pourrait catégoriser comme plus complexes, tels que la formation d'images mentales et d'associations avec des sons connus (Li, Cowan & Saults, 2013).

En résumé, différents moyens semblent efficaces pour réussir la tâche, mais ce n'est pas sans limites. En fait, plusieurs participants ont révélé s'être fiés simplement à l'évocation sonore pour les séquences considérées longues (6 et 8 sons), ce qui peut signifier qu'ils n'ont pas utilisé de stratégies mnésiques particulières supportant leur mémorisation pour ces séquences. L'abandon de stratégies mnésiques semble être en plus grande proportion chez les non-musiciens. Pour terminer, ce questionnaire a permis de mieux caractériser les stratégies mnésiques utilisées dans une tâche cognitive auditive. Puisque ces stratégies font de plus en plus de curieux, tant au niveau de la recherche fondamentale (p. ex. le monitoring) qu'en clinique (p. ex. l'étude des déficits de la mémoire épisodique chez les schizophrènes; Bonner-Jackson et al., 2005; Christensen et al., 2006), notre analyse qualitative pourra, je l'espère, apporter un support supplémentaire aux études à venir.

## **Les processus neuronaux qui sous-tendent la capacité de la MACT**

Au niveau des résultats électrophysiologiques de l'article ci-haut ont montré que l'amplitude de l'activité cérébrale mesurée aux électrodes fronto-centrales était hautement modulée par la charge en mémoire (*voir* Figures 2 et 3 dans l'article présenté ci-haut). Son amplitude augmentait de façon négative plus la charge en mémoire augmentait, et ce, jusqu'à 4 sons (*voir* Figures 2A et 3). Après ce point, une stabilisation de l'activité cérébrale a été observée pour les charges subséquentes à 4 sons, ce qui semble être le résultat de la saturation de la MACT (*voir* Figures 2B, 2C et 3). Suite à ces résultats, l'EM auditif moyen des participants de notre étude semble de 3 à 4 sons et un effet plafond est observable en électrophysiologie : une augmentation de l'activité neuronale entre 2 et 4 sons; l'atteinte d'un maximum à 4 sons; une stabilisation de l'activité entre 4 et 6 sons, suivi d'une légère baisse de l'activité à 8 sons (*voir* Figure 3).

La composante électrophysiologique observée dans notre étude avait toutes les caractéristiques de la SAN décrite par Guimond et al. (2010) et Lefebvre et al. (2013) : elle survient dans la période de rétention (900-1500 ms après le début de la rétention; *voir* Figure 6 de l'article présenté ci-haut); elle est plus prononcée aux électrodes fronto-centrale; et son amplitude augmente lorsque la charge en mémoire augmente, avant l'atteinte de l'EM. À la lumière de ces résultats, nous pouvons affirmer que nous avons isolé la SAN. Sa modulation par la charge en mémoire supporte notre hypothèse que la SAN est un index électrophysiologique de l'activité neuronale associée à la maintenance d'items auditive dans la MACT (Guimond et al., 2011; Nolden et al., 2013; Lefebvre et al., 2013). De plus, son amplitude est un bon indicateur de la capacité individuelle de la MACT, estimée par le K (*voir* figure 4 dans l'article présenté ci-haut).

Afin de compléter l'analyse électrophysiologique, nous avons séparé notre échantillon en deux groupes distincts : les musiciens et les non-musiciens. Malgré le fait que les données comportementales n'aient montré aucune différence significative, nous nous sommes intéressées à savoir si les données électrophysiologiques étaient différentes, comme le rapportent d'autres expériences en neuroimagerie (Gaser & Schlaug, 2003; Boh et al., 2011; Schulze, Mueller & Koelsch, 2011, Habibi, Wirantana & Starr, 2013). Les résultats montrent une différence non-significative entre les deux groupes. Par contre, une tendance pour un déplacement linéaire de la SAN vers le positif semble présente pour les musiciens. L'être humain étant conçu pour utiliser l'option qui lui demande le moins d'énergie possible (Engle & Kane, 2003), une des hypothèses possibles pour expliquer ce déplacement serait que les musiciens peuvent utiliser plus efficacement les stratégies mnésiques que les non-musiciens. Cela ne leur permettrait pas de maintenir plus de sons, mais de fournir moins d'efforts pour les utiliser. Dans les deux cas, l'amplitude de la SAN augmente entre la charge en mémoire de 2 et 4 sons et atteint un maximum à 4 sons. Cependant, nous pouvons remarquer que pour les non-musiciens, l'amplitude de la SAN reliée à la charge en mémoire de 8 sons tend à diminuer pour atteindre un voltage similaire à celle du 2 sons. Une proportion plus importante de non-musiciens a répondu utiliser l'évocation sonore (pas de stratégies mnésiques) pour les séquences considérées longues (6 et 8 sons) dans le questionnaire sur l'utilisation des stratégies mnésiques (*voir* Tableau 1 dans les résultats supplémentaires). Selon plusieurs études, le cortex préfrontal et le cortex pariétal seraient justement impliqués dans l'utilisation de stratégies mnésiques et le monitoring de l'information (Bor et al., 2004; Bor & Owen, 2007; Champod & Petrides, 2007; Edin et al., 2009; Chuderski et al., 2013). Ces régions étant également activées lors de la maintenance de sons en MACT (Grimault et al., 2009), il est

possible que les participants utilisent des stratégies mnésiques dans une tâche cognitive en audition telle que la nôtre. L'abandon de ces stratégies pourrait donc expliquer en partie cette tendance où l'activité neuronale est diminuée, par exemple au niveau du cortex préfrontal et du pariétal, des non-musiciens pour les séquences de 8 sons (*voir* Figure 6 dans résultats supplémentaires). Cela appuie tout de même notre hypothèse que la SAN est un bon index électrophysiologique de l'activité neuronale associée à la maintenance de sons dans la MACT. Dans ce cas, les variations de l'amplitude de la SAN seraient associées à l'augmentation et la baisse de l'activité de l'activité neuronale, tandis qu'un plateau serait une réelle stabilisation de l'activité. Il serait tout de même intéressant d'étudier cette différence avec de plus grande taille d'échantillon et un paradigme semblable à celui-ci pour confirmer ces résultats.

L'étendue de ces résultats a permis d'identifier des similitudes et des différences entre la MACT et la MVCT. Dans les deux modalités, des composantes électrophysiologiques sont reliées à la maintenance d'items dans la MCT et donc, modulées par la charge en mémoire (audition : SAN; vision : SPCN). De plus, l'amplitude de la SAN et de la SPCN est significativement prédite par le K individuel des participants. Le K serait donc un bon indicateur de la capacité individuelle de la MCT (Robitaille et al., 2010). De plus, Il semble que les participants peuvent percevoir tous les stimuli pendant l'encodage, par contre, la maintenance de nouveaux items n'est plus possible dès la saturation de la MCT (MACT et MVCT). Malgré ces similitudes, des différences subsistent. En effet, la topographie en EEG diffère d'une modalité à l'autre (audition : électrodes fronto-centrales; vision : électrodes postérieures). Les structures anatomiques de la MACT et de la MVCT ne semblent pas dépendre de réseaux de structures identiques (Grimault et al., 2009; Robitaille et al., 2010; Guimond et al., 2011; Nolden et al., 2013; Lefebvre et al., 2013). Des activations communes

peuvent tout de même être observées, notamment au niveau du cortex préfrontal et le cortex pariétal qui semblent tous deux impliqués dans l'utilisation de stratégies mnésiques et le monitoring de l'information (Bor et al., 2004; Bor & Owen, 2007; Champod & Petrides, 2007; Edin et al., 2009; Chuderski et al., 2013).

En résumé, la MACT et la MVCT semblent avoir des domaines spécifiques pour la maintenance d'items, soit leurs propres infrastructures et processus d'encodage. Malgré l'indépendance de ces processus d'encodage, les mécanismes responsables de la maintenance semblent opérer de façon similaire pour les deux modalités.

Bien que notre étude soit un apport important à la littérature portant sur la MACT, elle comporte certaines limites. Malgré le fait que les changements du contour mélodique soient minimisés dans notre étude, il y a des essais où le contour change. Les participants nomment même utiliser une stratégie mnésique qui vise à maintenir les changements de tonalité, ce qui veut dire que les changements du contour mélodique seront d'autant plus remarqués (p. ex. 1<sup>re</sup> séquence entre le 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> son : grave à aigu; 2<sup>e</sup> séquence entre le 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> son : aigu à grave). Une expérience future pourrait être réalisée en contrôlant parfaitement le contour mélodique. Dans les séquences différentes, le son différent devrait donc varier dans le même sens que le contour mélodique. Ces modifications méthodologiques impliquent toutefois beaucoup d'ajustements au niveau de la programmation de l'expérience et au niveau des sons, car plus de sons devraient être créés afin d'avoir un nombre suffisant d'essais.

Une limite quant à la nouveauté de ce paradigme est le choix des charges en mémoire, soit des séquences de 2, 4, 6 et 8 sons. Puisque l'EM auditif semble être aux alentours de 3 ou 4 sons, il serait intéressant de modifier la charge en mémoire de chacune des séquences (p. ex.

2, 3, 4 et 5). Avec ces charges en mémoire, il aurait été possible d'évaluer plus précisément l'EM auditif que dans la présente étude, tout en ayant la possibilité d'observer un effet plafond ou un plateau si les participants n'abandonnent pas la tâche. Malgré tout, notre étude a pu investiguer l'abandon des stratégies mnésiques lors de tâches cognitives auditives.

De plus, l'EEG nous permet difficilement de réaliser une localisation de sources précises. Malgré le fait que certaines études ont préalablement étudié la maintenance de sons variant en hauteur dans la MACT (Grimault et al., 2009; Nolden et al., 2013), leurs paradigmes ne permettaient pas d'étudier le dépassement de sa capacité. Il est alors difficile d'appuyer quelques-unes de nos hypothèses de façon plus tangible, par exemple, le lien entre la baisse de l'activité neuronale, l'abandon des stratégies et l'activité du cortex préfrontal et du cortex pariétal. La combinaison de plusieurs techniques d'imagerie dans l'étude des limitations de la MACT pourrait confirmer certaines de nos hypothèses, en plus de simplement augmenter nos connaissances sur le maintien des sons après l'atteinte de l'EM auditif quant à la localisation de l'activité neuronale (p. ex. Y a-t-il un déplacement de l'activité vers les régions adjacentes?) et son intensité (p. ex. Y a-t-il moins d'activité lorsqu'il y a un abandon des stratégies mnésiques et si oui, où?).

Pour conclure, notre étude est la première, au meilleur de nos connaissances, ayant investigué la saturation de la MACT en électrophysiologie. Plus précisément, nous avons réussi à isoler la SAN et ce, dans différents contextes. Nos résultats convergent vers une même conclusion, la maintenance de sons additionnels en MACT n'est plus possible après sa saturation, comme le démontrait plusieurs études comportementales (Prosser, 1995; Cowan, 2000; Li, Cowan & Sauls, 2013). L'intégration de ces résultats aux études précédentes permet d'appuyer fortement notre hypothèse que la SAN est un bon index électrophysiologique reliée

à la maintenance de sons dans la MACT (Guimond et al., 2011; Nolden et al., 2013 (2); Lefebvre et al., 2013). La découverte d'un tel index électrophysiologique est un apport considérable aux études fondamentales quant à la compréhension des mécanismes neuronaux qui sous-tendent la MACT (p. ex. similarité des mécanismes entre la modalité auditive et visuelle) ainsi qu'aux études cliniques en tant qu'appui dans l'étude de divers troubles de mémoire, plus précisément reliés à la MACT.

## Bibliographie

- Atkinson, R. C., Shiffrin, R. M., 1968. Human memory : A proposed system and its control processes. In Spence, K. W., Spence J. T. (Eds.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Vol.2, 89-195. New York: Academic Press.
- Atkinson, R. C., Shiffrin, R. M., 1971. The control processes of short-term memory. *Scientific American*, 225(2), 82-90.
- Baddeley, A. D., 2001. Is working memory still working? *American Psychologist*, 56, 851-864.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J., 1974. Workin memory. In Bower, G. H. (Eds.), *The psychology of learning and motivation*, 8, 47-89. New York: Academic Press.
- Baddeley, A., Logie, R., Bressi, S., Sala, S., Spinnler, H. (1986). Dementia and working memory. *The Quartely Journal of Experimental Psychology, Section A: Human Experimental Psychology*, 38(4), 603-618.
- Beaman, C. P., Morton, J., 2000. The separate but related origins of the recency effect and the modality effect in free recall. *Cognition*, 77(3), B59-B65.
- Berz, W. L., 1995. Working memory in music: A theoretical model. *Music Perception*, 12, 353-364.
- Boh, B., Herholz, S. C., Lappe, C., Pantev, C., 2011. Processing of Complex Auditory Patterns in Musicians and Nonmusicians. *PLoS ONE*, 6(7).
- Bonner-Jackson, A., Haut, K., Csernansky, J. G., Barch, D. M. (2005). The influence of encoding strategy on episodic memory and cortical activity in schizophrenia. *Biological Psychiatry*, 58(1), 47-55.
- Bor, D., Cumming, N., Scott, C. E. L., Owen, A. M., 2004. Prefrontal cortical involvement in verbal encoding strategies. *European Journal of Neuroscience*, 19(12), 3365-3370.
- Bor, D., Owen, A. M., 2007. A common prefrontal-parietal network for mnemonic and mathematical recoding strategies within working memory. *Cerebral Cortex*, 17, 778-786.

- Brigham, M. C., Pressley, M., 1988. Cognitive monitoring and strategy choice in younger and older adults. *Psychology and Aging*, 3(3), 249-257.
- Brisson, B., Jolicoeur, P., 2007. Electrophysiological evidence of central interference on the control of visual-spatial attention. *Psychonomic Bulletin & Review*. 14, 126–132.
- Brisson, B., Jolicoeur, P., 2007. A psychological refractory period in access to visual short-term memory and the deployment of visual-spatial attention: Multitasking processing deficits revealed by event-related potentials. *Psychophysiology*. 44, 323–333.
- Brisson, B., Jolicoeur, P., 2007. Cross-modal multitasking processing deficits prior to the central bottleneck revealed by event-related potentials. *Neuropsychologia*. 45, 3038–3053.
- Cameron, K. A., Henk, J. H., Grafman, J., Ruchkin, D. S., 2005. Long-term memory is the representational basis for semantic verbal short-term memory. *Psychophysiology*, 42(6), 643-653.
- Cavanagh, J. P., 1972. Relation between the immediate memory span and the memory search rate. *Psychological Review*, 79(6), 525-530.
- Champos, A. S., Petrides, M., 2007. Dissociable roles of the posterior parietal and the prefrontal cortex in manipulation and monitoring processes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104(37), 14837-14842.
- Chen, Z., Cowan, N., 2009. Core verbal working-memory capacity: The limit in words retained without covert articulation. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55, 75-84.
- Christensen, B. K., Girard, T. A., Benjamin, A. S., Vidailhet, P., 2006. Evidence for impaired mnemonic strategy use among patients with schizophrenia using the part-list cuing paradigm, *Schizophrenia Research*, 85(1-3), 1-11.
- Chuderski, A., Andrejczyk, K., Smolen, T., 2013. An oscillatory model of individual differences in working memory capacity and relational integration. *Cognitive systems research*. 24, 87–95.
- Conrad, R., Hull, A. J., 1964. Information, acoustic confusion and memory span. *British Journal of Psychology*, 55, 429-432.
- Conway, A. R., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., Engle, R. W., 2005. Working memory span tasks: A methodological review and user's

- guide. *Psychonomic Bulletin & Review*. 12(5), 769–786.
- Corriveau, I., Fortier-Gauthier, U., Jetté-Pomerleau, V., McDonald, J., Dell'Acqua, R., Jolicœur, P., 2012. Electrophysiological evidence of multitasking impairment of attentional deployment reflects target-specific processing, not distractor inhibition. *International Journal of Psychophysiology*. 86(2), 152–159.
- Cowan, N., 2000. The magical number 4 in short-term memory: a reconsideration of mental storage capacity. *Behaviour Brain Sciences*. 24(1), 87–114; discussion 114–185.
- Cowan, N., 2008. What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Progress in Brain Research*. 169, 323-338.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., Conway, A. R. A., 2005. On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51(1), 42-100.
- D'Esposito, M., 2007. From cognitive to neural models of working memory. *Philosophical transactions of the royal society*. 362, 761–772.
- Dell'Acqua, R., Sessa, P., Jolicœur, P., Robitaille, N., 2006. Spatial attention freezes during the attentional blink. *Psychophysiology*. 43, 394–400.
- Drew, T., McCollough, A. W., Horowitz, T. S., Vogel, E. K., 2009. Attentional enhancement during multiple-object tracking. *Psychonomic Bulletin & Review*. 16, 411–417.
- Edin, F., Klingberg, T., Johansson, P., McNab, F., Tegnér, J., Compte, A., 2009. Mechanism for top-down control of working memory capacity. *Proceeding of National Academy of Sciences of United States of America (PNAS)*. 106(16), 6802-6807.
- Engle, R. W., 2002. Working Memory Capacity as Executive Attention. *Current Directions in Psychological Sciences*, 11(1), 19-23.
- Engle, R. W., & Kane, M. J., 2003. Executive attention, working memory capacity, and a two-factor theory of cognitive control. *Psychology of Learning and Motivation*. 44, 145-199.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Hohnsbein, J., Kleinsorge, T., 2003. Short-term mobilization of processing resources is revealed in the event-related potential. *Psychophysiology*, 40(6), 914-923.
- Fort, I., 2005. La métamémoire : analyse de sa mesure par questionnaire. Étude exploratoire. *Psychologie française*. 50, 195-210.

- Foster, N. E. V., Zatorre, R. J., 2010. Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *NeuroImage*, 53(1), 26-36.
- Gaser, C. & Schlaug, G., 2003. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240-9245.
- Gathercole, S. E., Service, E., Hitch, G. J., Adams, A., Martin, A. J., 1999. Phonological short-term memory and vocabulary development: further evidence on the nature of the relationship. *Applied Cognitive Psychology*, 13(1), 65-77.
- Guimond, S., Vachon, F., Nolden, S., Lefebvre, C., Grimault, S., Jolicoeur, P., 2011. Electrophysiological correlates of the maintenance of the representation of pitch objects in acoustic short-term memory. *Psychophysiology*. 48(11), 1500–1509.
- Grimault, S., Lefebvre, C., Vachon, F., Perez, I., Zatorre, R., Robitaille, N., Jolicoeur, P., 2009. Load-dependant Brain Activity Related to Acoustic Short-term Memory for Pitch: Magnetoencephalography and fMRI. *The Neurosciences and Music III: Disorders and Plasticity*. 1169, 273–277.
- Habibi, A., Wirantana, V., Starr, A., 2013. Cortical activity during perception of musical pitch comparing musicians and nonmusicians. *Music perception: An Interdisciplinary Journal*, 30(5), 463-479.
- Harrison, A., Jolicoeur, P., Marois, R., 2010. 'What' and 'where' in the intraparietal sulcus: An fMRI study of object identity and location in visual short-term memory. *Cerebral Cortex*. 20, 2478–2485.
- Hulme, C., Roodenrys, S., 1995. Practitioner Review: Verbal working memory development and its disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 36(3), 373-398.
- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evan, A. C., Gottfried S., 2009. Musical training shapes structural brain development. *The Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019-3025.
- Jolicoeur, P., Brisson, B., & Robitaille, N., 2008. Dissociation of the N2pc and sustained posterior contralateral negativity in a choice response task. *Brain Research*. 1215, 160–172.
- Jolicoeur, P., Lefebvre, C., Grimault, S., Vachon, F., Zatorre, R., Peretz, I., 2008 (October). Brain mechanisms of auditory short-term memory: Converging evidence from EEG,

- MEG, and fMRI. Talk to be presented at the Annual Meeting of the Society for Psychophysiological Research, Austin, Texas, USA, October 1–5.
- Jolicœur, P., Sessa, P., Dell'Acqua, R., Robitaille, N., 2006a. On the control of visual spatial attention: Evidence from human electrophysiology. *Psychological Research*. 70, 414–424.
- Jolicœur, P., Sessa, P., Dell'Acqua, R., Robitaille, N., 2006b. Attentional control and capture in the attentional blink paradigm: Evidence from human electrophysiology. *European Journal of Cognitive Psychology*. 18, 560–578.
- Jonides, J. S., E. H.; Smith, E. E.; Lauber, E. J.; Awh, E.; Minoshima, S., Koeppe R. A., 1997. Verbal Working Memory Load Affects Regional Brain Activation as Measured by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 9(4), 462-475.
- Klaver, P., Talsma, D., Wijers, A. A., Heinze, H-J., Mulder, G., 1999. An event-related brain potential correlate of visual short-term memory. *NeuroReport*. 10, 2001–2005.
- Lang, W., Starr, A., Lang, V., Lindinger, G., Deecke, L., 1992. Cortical DC potential shifts accompanying auditory and visual short-term memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 81(4), 285-295.
- Leek, M. R., 2001. Adaptive procedures in psychophysical research. *Perception & Psychophysics*, 63(8), 1279-1292.
- Lefebvre, C. V., F., Grimault S., Thibault, J., Guimond, S.; Peretz, I., Zatorre, R. J., Jolicœur, P., 2013. Distinct electrophysiological indices of maintenance in auditory and visual short-term memory. *Neuropsychologia*, 51(13), 2939–2952.
- Lefebvre, C., Jolicoeur, P., Dell'Acqua, R., 2010. Electrophysiological evidence of enhanced cortical activity in the human brain during visual curve tracing. *Vision Research*. 50, 1321–1327.
- Lehnert, G., Zimmer, H. D., 2006. Auditory and visual spatial working memory. *Memory & Cognition*, 34(5), 1080-1090.
- Li, D., Cowan, N., Saults, J. S., 2013. Estimating working memory capacity for lists of nonverbal sounds. *Attention, Perception & Psychophysics*. 75(1), 145-160.
- Luck, S. J., Vogel, E. K., 1997. The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*. 390(6657), 279-281.

- Martin, N., Saffran, E. M., 1997. Language and auditory-verbal short-term memory impairments: Evidence for common underlying processes. *Cognitive Neuropsychology*, 14, 641-682.
- McFarland, D. J., Cacace, A. T., 1992. Aspects of short-term acoustic recognition memory: modality and serial position effects. *Audiology: official organ of the international Society of Audiology*, 31(6), 342-352.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97.
- Morey, C. C., Cowan, N., Morey, R. D., Rouder, J. N., 2011. Flexible attention allocation to visual and auditory working memory tasks: Manipulating reward induces a tradeoff. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73, 458-472.
- Näätänen, R., Picton, T., 1987. The N1 wave of human electric and magnetic response to sound: A review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*. 24(4), 375-425.
- Nolden, S., Bermudez, P., Alunni-Menichini, K., Lefebvre, C., Grimault, S., Jolicoeur, P., 2013. Electrophysiological correlates of the retention of tones differing in timbre in auditory short-term memory. *Neuropsychologia*, 51(13), 2740–2746.
- Nolden, S., Grimault, S., Guimond, S., Lefebvre, C., Bermudez, P., 2013. The retention of simultaneous tones in auditory short-term memory: A magnetoencephalography study. *NeuroImage*, 82, 384-392.
- Pashler, H., 1988. Familiarity and visual change detection. *Percept Psychophys*. 44(4), 369-378.
- Penney, C. G., 1989. Modality effects and the structure of short-term verbal memory. *Memory Cognition*, 17(4), 398-422.
- Petrides, M., Milner, B., 1982. Deficits on subject-ordered tasks after frontal- and temporal-lobe lesions in man. *Neuropsychologia*, 20(3), 249-262.
- Pollack, I., 1953. Assimilation of sequentially encoded information. *The American Journal of Psychology*, 66(3), 421-435.
- Postle, B. R., 2006. Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139, 23-28.

- Prime, D. J., Jolicoeur, P., 2010. Mental rotation requires visual short-term memory: Evidence from human electric cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 22, 2437–2446.
- Prosser, S., 1995. Aspects of short-term auditory memory as revealed by a recognition task on multi-tone sequences. *Scandinavian audiology*. 24(4), 247-253.
- Robitaille, N., Marois, R., Todd, J., Grimault, S., Cheyne, D., Jolicoeur, P., 2010. Distinguishing between lateralized and nonlateralized brain activity associated with visual short-term memory: fMRI, MEG, and EEG evidence from the same observers. *Neuroimage*. 53(4), 1334-1345.
- Ruchkin, D. S., Berndt, R. S., Johnson R. Jr., Ritter, W., Grafman, J., Canoune, H. L., 1997. Modality-specific processing streams in verbal working memory: Evidence from spatio-temporal patterns of brain activity. *Cognitive Brain Research*. 6, 95-113.
- Ruchkin, D. S., Berndt, R. S., Johnson R. Jr., Grafman, J., Ritter, W., Canoune, H. L., 1999. Lexical contributions to retention of verbal information in working memory: event-related brain potential evidence. *Journal of Memory and Language*, 41(3), 345-364.
- Ruchkin, D. S., Grafman, J., Cameron, K., Berndt, R. S., 2003. Working memory retention systems: A state of activated long-term memory. *Behavioral and Brain Sciences*. 26, 706-777.
- Ruchkin, D. S., Johnson, R., Jr., Grafman, J., Canoune, H., Ritter, W., 1992. Distinctions and similarities among working memory processes: an event-related potential study. *Cognitive Brain Research*. 1(1), 53-66.
- Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J. E., Glover, G. H., Gabrieli, J. D. E., 1999. Load-dependent Roles of Frontal Brain Regions in the maintenance of Working Memory. *NeuroImage*. 9(2), 216–226.
- Salo, S. K., Lang, A. H., Salmivalli, A. J., Johansson, R. K., Peltola, M. S., 2003. Contralateral white noise masking affects auditory N1 and P2 waves differently. *Psychophysiology*. 17(4), 189–194.
- Saults, J. S., Cowan, N., 2007. A central capacity limit to the simultaneous storage of visual and auditory arrays in working memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 663-684.

- Schendel, Z. A., Palmer, C., 2007. Suppression effects on musical and verbal memory. *Memory and Cognition*. 35(4), 640–650.
- Schulze, K., Mueller, K., Koelsch, S., 2011. Neural correlates of strategy use during auditory working memory in musicians and non-musicians. *European Journal of Neuroscience*, 33(1), 189-196.
- Schumacher, E. H., Lauber, E., Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., Koeppel, R. A., 1996. PET evidence for an amodal verbal working memory system. *Neuroimage*. 3(2), 79–88.
- Shaffer, W., Shiffrin, R. M., 1972. Rehearsal and storage of visual information. *Journal of Experimental Psychology*, 92(2), 292-296.
- Taylor, M. M., Douglas Creelman C., 1967. PEST: Efficient Estimates on Probability Functions. *Journal of the Acoustical Society of America*. 41(4A), 782-787.
- Todd, J. J., Marois, R., 2004. Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature*. 428, 751–754.
- Trehub, S. E., Schellenberg, E. G., Kamenetsky, S. B., 1999. Infants' and adults' perception of scale structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 25(4), 965–975.
- Vogel, E. K., Machizawa, M. G., 2004. Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*. 428(6984), 748-751.
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., Luck, S. J., 2001. Storage of features, conjunctions and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 27(1), 92-114.
- Wiswede, D., Rüsseler, J., Münte, T. F., 2007. Serial position effects in free memory recall – An ERP-study. *Biological Psychology*, 75(2), 185-193.

## **ANNEXE 1**

# **Questionnaire sur l'expérience musicale**

(Traduit par Hyde et al., 2009)

**Questionnaire sur l'expérience musicale** (traduit de Hyde et al)

Nom: \_\_\_\_\_ Date: \_\_\_\_\_

Âge: \_\_\_\_\_ Date de naissance: \_\_\_\_\_ Genre: **F** **M**

1) Vous considérez-vous comme un(e) musicien(ne)? ..... **OUI NON**

2) En ce moment, êtes-vous impliqué dans une ou des activité(s) musicale(s)? ..... **OUI NON**  
Si non, indiquez depuis combien de temps vous avez arrêté : \_\_\_\_\_

3) Avez-vous déjà joué d'un instrument? ..... **OUI NON**  
Si oui veuillez préciser le(s)quel(s): \_\_\_\_\_

4) Combien de temps avez-vous joué de votre instrument? \_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez commencé : \_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez arrêté : \_\_\_\_\_

5) Pouvez-vous lire une partition? ..... **OUI NON**

6) Pouvez-vous écrire de la musique? ..... **OUI NON**

7) Avez-vous une formation **pratique** en musique? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser : \_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez commencé : \_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez arrêté : \_\_\_\_\_

8) Quel(s) genre(s) de style musical (jazz, classique, etc.) avez-vous appris? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

9) Avez-vous une formation **théorique** en musique? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser : \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez commencé : \_\_\_\_\_  
Âge auquel vous avez arrêté : \_\_\_\_\_

10) Avez-vous ou allez-vous recevoir un diplôme/certificat en musique, ou une certification remise par un conservatoire/programme de musique reconnu? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser: \_\_\_\_\_

11) Y'a-t-il des musiciens dans votre famille immédiate? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser : \_\_\_\_\_

12) Avez-vous l'oreille absolue (ou relative)? ..... **OUI NON**

13) Avez-vous des problèmes auditifs? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser : \_\_\_\_\_

14) Avez-vous des problèmes avec la musique? ..... **OUI NON**  
Si oui, veuillez préciser : \_\_\_\_\_

## **ANNEXE 2**

### **Questionnaire sur la perception de l'utilisation de stratégies mnésiques dans une tâche cognitive en audition**

**NOM :**

**Expérience :**

**#sujet :**

**Questionnaires STRATÉGIES MNÉSQUES :** (Répondre OUI ou NON aux questions)

**1. As-tu utilisé la stratégie de répétition sub-vocale?**

- a. As-tu répété la séquence de sons dans ta tête plusieurs fois pendant la pause?
- b. Étais-tu capable de répéter la séquence au complet dans ta tête?

**2. As-tu utilisé la stratégie de maintenir les changements de tonalités?**

- a. As-tu retenu les changements de tonalités dans la séquence : grave à aigu et aigu à grave (2 directions)?
- b. Seulement de grave à aigu (1 direction)?
- c. Seulement de aigu à grave (1 direction)?

**3. As-tu utilisé des repères sonores?**

- a. As-tu retenu les sons qui sortaient de l'ordinaire?
- b. As-tu retenu davantage les notes plus aiguës?
- c. As-tu retenu davantage les notes plus graves?
- d. Autres caractéristiques?

**Si tu as répondu « OUI » aux questions 2 et/ou 3,**

Pour compléter tes réponses, répond aux questions « a. » et « b. » qui suivent:

**a. Afin de maintenir en mémoire les repères sonores (sons qui sort du l'ordinaire) ou les changements de tonalités (aigu à grave ou vice-versa) de la 1<sup>ère</sup> séquence,**

- a. As-tu retenu la (les) position (s) du son ou changement de tonalité dans la séquence ?
  - i. Si oui, en majorité, tu retenais ces son lorsqu'ils étaient présentés au début, au milieu ou à la fin de la séquence?
- b. As-tu répété ceux-ci dans ta tête plusieurs fois pendant la pause?
- c. As-tu utilisé une image mentale pour les changements de tonalité ou repères sonores?
  - i. Peux-tu donner un exemple?
- d. As-tu utilisé une autre façon de les mémoriser?
  - i. Laquelle?

**b. Combien de repères sonores ou de changements de tonalités retenais-tu en général (Dans les séquences plus longues) ?**

**4. As-tu utilisé une image mentale de la séquence complète?**

- a. Par un graphique, ligne qui suit le ton (aigu à grave) de chaque son?
- b. Par une partition de musique?
- c. Une autre image, laquelle?

**5. As-tu utilisé des associations?**

- a. Association verbale : As-tu répété les sons avec ta voix (pas seulement dans la tête)?
  - i. Si oui, as-tu retenu le mouvement de ton élocution plus que les sons en tant que tel?
- b. As-tu comparé les sons entendus à des sons que tu connaissais déjà pour former une séquence plus structurée?

**6. T'es-tu fié simplement à l'évocation sonore?**

- a. As-tu tout simplement essayé de comparer l'ensemble de la séquence à la seconde sans stratégie?
  - i. Si oui, tu n'as pas utilisé de stratégies pour l'ensemble des séquences?
  - ii. Pour les séquences plus courtes seulement, combien de sons?
  - iii. Pour les séquences plus longues seulement, combien de sons?
  - iv. Seulement par inattention?

**7. Lorsque la séquence était trop longue, as-tu abandonné les autres stratégies?**

- a. Utilisais-tu d'autres stratégies pour les séquences plus courtes?
  - i. Combien considères-tu qu'il y a de sons dans une séquence courte?
  - ii. Si ta réponse est OUI, réponds aux autres questions pour la (les) stratégie (s) utilisée (s) et réponds à la prochaine question.
- b. À combien de sons, abandonnais-tu l'utilisation des stratégies?

**Pour terminer le questionnaire,**

- Te considères-tu comme musicien?
- As-tu utilisé plusieurs stratégies?
  - Si oui, peux-tu les classer en ordre décroissant (le plus utilisé au moins utilisé)?  
*Tu peux seulement écrire le numéro de la question correspondant à la stratégie.*